

Poděkování prof. Ing. Tomáši Elbelovi, CSc. a doc. Ing. Jiřímu Hamplovi, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce, dále Ing. Stanislavu Brotánkovi, CSc. a Ing. Vlastimilu Vlkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k praktické části bakalářské práce.

ABSTRAKT

V práci je pojednáno o filtraci těžkých ocelových odlitků s využitím různých typů filtrů a jejich sestav do filtračních kompletů. Je vyhodnocen vliv filtrace na jakost povrchu odlitků, množství vměstků vyskytujících se v odlitcích a mechanické vlastnosti oceli. Vyhodnocení vlivu filtrace je dokumentováno podrobnou mikroskopickou analýzou odlité oceli, z hlediska její mikročistoty, provedenou na rastrovacím elektronovém mikroskopu a energiově disperzním analyzátoru (mikrosonda). V práci jsou uvedena zařízení, na kterých se ocel vyráběla a typy vtokových soustav, použitých pro zkušební ocelové odlitky. Součástí práce je popis metalurgie a technologie lití těžkého ocelového odlitku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Filtr, filtrační karusel, vměstky, ocel, rafinace.

ABSTRACT

The work deals with the filtration of heavy steel castings with the use of various types of filters and filtration sets. The effect of filtration on the quality of casting surface is evaluated, as well as the amount of inclusions present in castings and mechanical characteristics of steel. The evaluation of the filtration effect is documented by a detailed microscopic analysis of cast steel in terms of its micropurity, performed at Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive Spectroscopy. The device that helped to produce steel and the types of gatings used for the trial castings are presented in this work. This work also provides a description of metallurgy and pouring technology of the heavy steel casting.

KEY WORDS

Filter, filtration carousel, inclusions, steel, refining.

OBSAH

1	ÚVOD.....	1
1.1	Stanovení cíle bakalářské práce.....	1
1.2	Postup řešení	1
2	LITERÁRNÍ ROZBOR METOD FILTRACE OCELOVÝCH ODLITKŮ.....	2
2.1	Druhy filtrů	2
2.1.1	Licí sítko (cedítka)	3
2.1.2	Filtry.....	3
2.1.2.1	Ploché filtry	3
2.1.2.2	Objemové filtry.....	4
2.1.2.3	Vliv filtrů na proudění kovu	6
2.2	Filtrace těžkých ocelových odlitků	8
2.2.1	Filtrační kazeta, rošt.....	8
2.2.2	Filtrační karusel, šnek	8
3	NÁVRH METALURGIE A TECHNOLOGIE LITÍ ODLITKŮ.....	10
3.1	Návrh metalurgie	10
3.2	Návrh technologie	11
4	NÁVRH VTOKOVÉ SOUSTAVY A UMÍSTĚNÍ FILTRAČNÍCH KARUSELŮ	13
5	PROVEDENÍ TAVEB A ODLITÍ ODLITKŮ	19
5.1	Zařízení, na kterých se ocel vyráběla.....	19
5.2	Vlastní provedení tavby	22
5.3	Odlití odlitků	24
6	ROZBOR MIKROČISTOTY OCELI A JAKOSTI POVRCHU ODLITKŮ.....	25
6.1	Rozbor mikročistoty oceli	25
6.2	Rozbor jakosti povrchu	40
7	ROZBOR MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ ODLITKŮ Z PŘILITÝCH TĚLES.....	42
8	VYHODNOCENÍ ZJIŠTĚNÝCH VÝSLEDKŮ	45
9	VYHODNOCENÍ CÍLŮ PRÁCE	46
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	47

1 ÚVOD

V provozu slévárny PILSEN STEEL s.r.o. (dříve ŠKODA HUTĚ s.r.o.) se v současné době využívá dvou způsobů odlévání ocelových odlitků:

- 1) z rafinační pánve ASEA
- 2) ze zátkových licích pánví

Tyto dva způsoby odlévání jsou zvoleny z důvodu různých nosností jeřábů na jednotlivých pracovních polích slévárny. Ocel odlévaná z rafinační pánve má velmi vysokou čistotu, ale při přelévání taveniny do licí pánve dochází k zanášení nekovových vměstků – produktů reoxidace a mechanického otěru.

Kvůli výše uvedeným způsobům odlévání bylo nutné odzkoušet možnost filtrace oceli. Při provozních zkouškách filtrování přímými filtry docházelo během odlévání k rozlomení filtrů. Hledal se tedy jiný způsob pro filtraci oceli.

1.1 Stanovení cíle bakalářské práce

Cílem této práce bylo ověření účinnosti filtračního karuselu pro filtraci oceli.

1.2 Postup řešení

- Návrh metalurgie a technologie lití odlitku
- Návrh vtokové soustavy a umístění filtračního karuselu
- Provedení tavby a odlití odlitku
- Rozbor mikročistoty oceli a jakosti povrchu odlitku
- Rozbor mechanických vlastností odlitku z přilitých těles
- Závěrečné zhodnocení výsledků

2 LITERÁRNÍ ROZBOR METOD FILTRACE OCELOVÝCH ODLITKŮ

Filtrace oceli je specialitou mezi filtrací slévárenských slitin. Důvodem je vysoká lící teplota znamenající vysoké nároky na vtokovou soustavu a především na filtry.

Existuje několik typů filtrů určených k filtraci oceli, které se liší svou konstrukcí, oblastí použití i filtrační účinností. Z hlediska tvaru se dělí do dvou základních typů:

- ploché filtry
- objemové filtry

Tyto dva druhy filtrů se liší mechanismem filtrace:

Filtrace cezením: tento způsob filtrace spočívá v zachytávání vměstků větších, než je velikost otvorů filtru na jeho přítokové straně. Tímto způsobem lze zachytit pouze velké částice, které tvoří blány nebo shluky. [1,2,3,4]

Tvorba filtračního koláče navazuje na zachycení prvních vměstků na filtru. Na těchto částicích se při průtoku zachycují další, menší částice. Tato vrstva vměstků se postupně zvětšuje a tím zpomaluje průtok kovu až do ucpání filtru. Pomocí filtračního koláče je možné zachytit i velmi drobné vměstky i s rozměry 1-5 μm . [1,2,3,4]

Hlubková filtrace probíhá v celém objemu filtru. Princip tohoto mechanismu spočívá v nalepování vměstků na stěny keramiky filtru a ve vzájemném spojení jednotlivých vměstků. Při hlubkové filtraci vměstky obalují keramiku filtru a tvoří „mosty“, jejichž okraje jsou zachyceny na kanálech filtru. Na účinnost hlubkové filtrace má vliv teplota kovu, chemické složení materiálu filtru a vměstků (vzájemná smáčivost) a tvar kanálů. Ke snazšímu zachycení vměstků dochází v případě, že dochází ke kontaktu s více stěnami filtru. K zachycení vměstků snáze dojde v menším průřezu kanálu, kde nastává víření kovu a změna směru proudění.

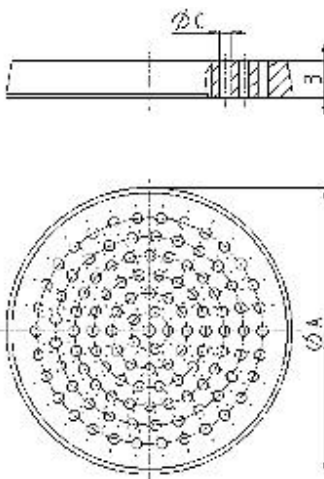
Má-li být vměstek ve filtru zachycen hlubkovou filtrací, musí být adhezni síly větší než dynamický účinek kovu, který se snaží vměstky strhnout do proudu. Nejlepší místa pro zachycení vměstků jsou taková místa ve filtru, kde je velmi malá rychlost proudění. Různé materiály filtrů a různé vměstky mají rozdílnou smáčivost tekutým kovem, a tudíž i schopnost zachycovat vměstky není stejná. Čím menší je smáčivost tuhého vměstku a filtru kovem, tím lépe se vměstky zachycují. Při teplotách proudícího kovu lze předpokládat i vznik chemických reakcí a vazeb mezi vměstky a filtrem. U chemicky reagujících systémů dochází k postupnému chemickému propojování keramiky filtru a vměstků. Z tohoto důvodu mohou mít filtry s tavící teplotou (teplotou měknutí) blízkou lící teplotě kovu, vyšší filtrační účinnost než filtry z vysoce žáruvzdorné keramiky. [1,2,3,4]

2.1 Druhy filtrů

Keramické elementy, které je možné použít k zachycování vměstků ve vtokových soustavách, se dělí na lící sítko (cedítka) a filtry.

2.1.1 Licí sítko (cedítka)

Jsou to plochá keramická tělíska s přímými kruhovými otvory nejčastěji o velikosti 4-10 mm a tloušťce 6-20 mm [4] viz obr. 1. Jejich účelem je zachycení primární strusky zpočátku lití. Celkový průřez otvorů v cedítce bývá menší, než je průřez vtokového kůlu. Jestliže není vtoková soustava dimenzována jako silně přetlaková, tvoří cedítka „řídící průřez“ vtokové soustavy. Pod cedítkem může vzniknout oblast, která není zcela zaplněna kovem. Celkový průřez otvorů v cedítce by měl být větší než průřez kůlu. Cedítka zadrží především hrubší částice strusky. [1,2,3,4]



Obr. 1 Keramické sítko

2.1.2 Filtry

Rafinační mechanismus spočívá v blokování větších částic vměstků na přítokové straně filtru, ale kromě toho se zde uplatňuje i mechanismus tvorby „filtračního koláče“ a „hloubková filtrace“. Tímto způsobem lze zachytit i vměstky podstatně menší než je velikost otvorů filtru, a to až do velikosti několika mikrometrů. Důležitou charakteristikou je poměr průtočné plochy k ploše celkové. Část plochy tvořená keramikou omezuje průtočný průřez. Abychom neseškrtili proud kovu, je potřeba volit celkový průtočný průřez otvorů nejméně tak, aby se rovnal řídícímu průřezu vtokové soustavy. Čím větší je průtočný průřez otvorů filtru, tím menší je odpor proti proudění kovu. Čím jemnější je filtr, tím lepší je filtrační účinek. Musíme také počítat s dřívějším ucpáním filtru. [1,2,3,4]

2.1.2.1 Ploché filtry

Ploché filtry mají podobnou funkci jako cedítka. Nečistoty větších rozměrů než jsou otvory filtru, částečně i menší částice, se zachycují na přítokové straně filtru, kde se postupně vytváří filtrační koláč. Nelze u nich využít hloubkové filtrace. Jako ploché filtry se používají kovové mřížky, častěji však tkané textilie ze žáruvzdorných vláken. Kovové mřížky lze použít pouze pro slitiny s nižší licí teplotou, proto nejsou vhodné pro filtrování oceli. [1,2,3,4]

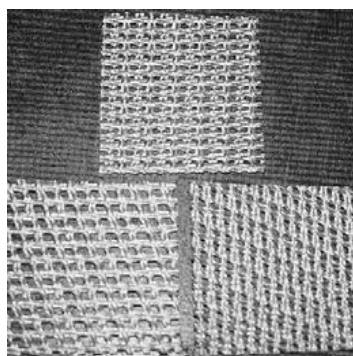
- **Tkaninové filtry** – jsou utkány z vláken amorfního SiO_2 s čistotou 97-99% [1] a tvoří mřížku filtru, viz obr. 2. Filtr se dále tepelně a chemicky zpracovává, čímž zvyšuje svou tuhost a vlastnosti za vysokých teplot. Maximální teplota lití bývá 1 620°C [1]. Pro

zlepšení filtrační účinnosti může být textilie filtru aktivována napuštěním speciální pryskyřicí. Velikost ok tkaninového filtru pro ocel by měla být 1,0 – 2,0 mm.

Při používání tkaninových filtrů by se měla zvýšit lící teplota o 15-30 °C. V průběhu odlévání může dojít k prohnutí, a proto je nutné umístit filtr tak, aby nezasahoval do odlitku. Pro vtoky s tkaninovými filtry je doporučeno volit následující poměr průřezů:

$$S_{\text{kůlu}} : S_{\text{kanálu}} : S_{\text{filtru}} : S_{\text{zářezu}} = 1 : 2 : 4 : 2 \quad [1]$$

Použití tohoto filtru je vhodné pro přesné lití metodou vytavitelného modelu. [1,2,4]

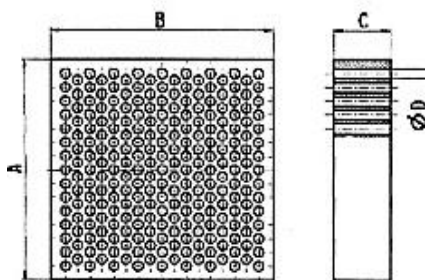


Obr. 2 Tkaninový filtr

2.1.2.2 Objemové filtry

U objemových filtrů se využívá filtračního účinku na přítokové straně filtru s tvorbou filtračního koláče a schopnosti hloubkové filtrace. Do skupiny objemových filtrů patří *lisované filtry*, *extrudované filtry* a *pěnové filtry*. [1,2,4]

- **Lisované filtry** – jsou podobné slévarenským cedítkům. Vyrábí se lisováním polosuché keramické směsi. Průtočné otvory se nejčastěji vyrábí kruhové. Průměr otvorů bývá okolo 1,8 – 2,5 mm a tloušťka v rozmezí 10 – 22 mm, viz obr. 3. Pro výrobu tohoto filtru se obvykle využívá mullit. [1,2,4]



Obr. 3 Lisovaný filtr

- **Extrudované filtry** – vyrábí se protlačováním plastické keramické hmoty s otvory do čtvercového, obdélníkového nebo trojúhelníkového tvaru. Tento filtr má větší průtočný průřez a menší tepelnou kapacitu. Díky čtvercovým kanálům, viz obr. 4, mají filtry velmi účinnou hloubkovou filtraci. Tloušťka protlačovaných filtrů bývá 10 – 20 mm. [1] Čím větší je tloušťka filtru, tím je účinnější hloubková filtrace a lepší

odolnost proti mechanickému namáhání proudícím kovem. Tlusté filtry mají větší tepelnou kapacitu a více ochlazují tekutý kov. Tento filtr se obvykle vyrábí ze směsi zirkonia a spinelu. [1,2,4]



Obr. 4 Extrudovaný filtr

- **Pěnové filtry** – jsou tvořeny systémem vzájemně propojených buněk tvaru pentaedru. Pěnové filtry, viz obr. 5, se vyrábí napouštěním polyuretanové pěnové matrice vhodnou keramickou suspenzí, kterou tvoří zirkonium nebo směs hlinitanu a uhlíku. Filtry se liší velikostí pórů. Pórovitost se hodnotí počtem pórů na délkový palec (25,4 mm) a označuje se ppi (pores per inch). Pro filtraci oceli je možné použít pórovitost 10 – 20 ppi. [1] Způsob proudění kovu v pěnovém filtru, při kterém dochází ke vzniku místních vírů a častým změnám směru, je výhodný pro hloubkovou filtraci.



Obr. 5 Pěnový filtr

Účelem této filtrace je odstranění velmi drobných vměstků až do velikosti 1 – 5 μm . Průtočná kapacita filtru závisí na množství vměstků obsažených v tavenině, velikosti pórů a na přilnavosti vměstků k filtru (na materiálu, ze kterého je filtr vyroben). Ve srovnání s předchozími typy, jsou pěnové filtry nejvýhodnější v oblasti hloubkové filtrace. I v případě pěnových filtrů platí: čím větší je tloušťka, tím účinnější je filtrace. Tloušťka těchto filtrů bývá 12 – 50 mm. [1,2,4]

Vlastnosti, kterými se nejčastěji hodnotí vlastnosti filtrů:

- Pevnost filtru v ohybu za normálních a vysokých teplot
- Odolnost proti creepu (prolomení)
- Odolnost proti teplotnímu šoku
- Odolnost proti chemickému vlivu strusek

2.1.2.3 Vliv filtrů na proudění kovu

Filtry ve vtokové soustavě slouží k zachytávání vměstků a ke změně proudění kovu. Vtoková soustava s filtry se projevuje následujícími způsoby:

- Změnou rychlosti lití
- Uklidněním proudu kovu a omezením turbulence

Rychlost lití

Vtoková soustava s filtrem nemá rovnoměrný průběh lití – má několik časových etap:

- Doba protečení filtru (priming)
- Doba rovnoměrného průtoku
- Doba intenzivního snižování průtoku filtru

Proces, kdy dochází k zaplnění pórů filtru kovem a k plynulému průtoku, se označuje jako priming. Priming můžeme rozdělit na dvě části.

V první části kov přitéká k filtru a vstupuje do pórů. Odpor proti protečení je možné určit vztahem (1)

$$R_{\text{prot}} = - \frac{\sigma_{MF} \cdot \cos \varphi}{d \cdot \rho} \quad (\text{Nm.kg}^{-1}) \quad (1)$$

kde σ_{MF} je povrchové napětí kovu (N.m^{-1})

φ – úhel smáčení ($^{\circ}$),

d – poloměr kanálu (m),

ρ – hustota kovu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Pokud je filtr méně smáčivý (větší úhel φ) a má menší otvory, zvyšuje se odpor kapilárních sil. U filtrů s malými otvory a při malé licí výšce nebo při nízké teplotě kovu, mohou vznikat problémy.

Ve druhé části zaplňuje tekutý kov celou délku kanálu filtru. V této části primingu je potřeba velké energie k překonání odporu proti proudění v kanálech. Při primingu dochází k velkým teplotním ztrátám – zvyšuje se viskozita, případně může kov ve filtru zatuhnout. Při použití filtru je nutné taveninu přehřát, kdežto u lití bez filtru toto nutné není. Přehřátím kovu je tak značně usnadněno protečení dalšího kovu. Tlak nutný k primingu může být značně vysoký, a proto musí mít forma přiměřenou výšku pro vytvoření dostatečného metalostatického tlaku. Při zanášení filtru se začne průtok snižovat, až dojde k jeho úplnému zablokování. Proto je nutné volit velikost filtru tak, aby bylo lití ukončeno v době dostatečného průtoku. [1]

Omezení turbulence

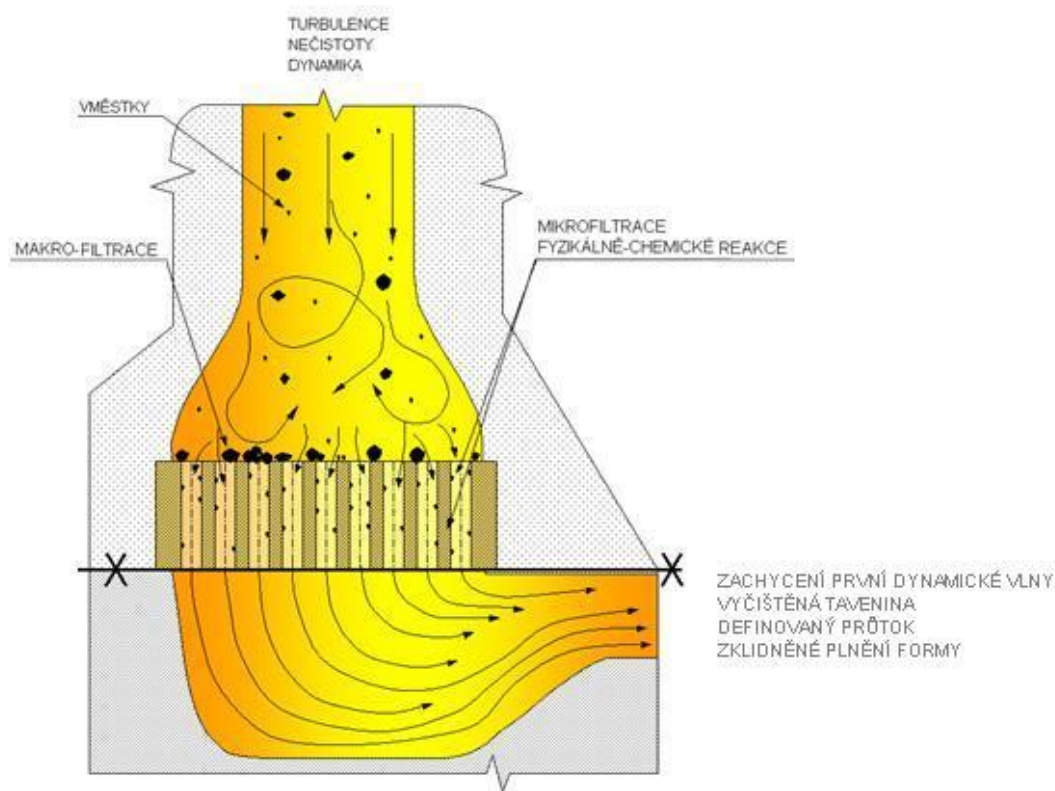
Proudění ve vtokové soustavě a zejména ve vtokovém kůlu je doprovázeno velmi intenzivním vířením. Toto víření má za následek erozi stěn formy, oxidaci kovu, jejímž důsledkem je vznik vměstků a strhávání vzduchu. Způsob proudění je závislý na druhu kovu, na tvaru vtokové soustavy, změnách směru proudu kovu a na rychlosti proudění. Charakter proudění je určen Reynoldsovým číslem, které lze vypočítat pomocí vzorce (2).

$$Re = \frac{v \cdot D_h}{\nu} \quad (1) \quad (2)$$

kde v je rychlost proudění kovu ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
 D_h – hydraulický průměr kanálu (m),
 ν – kinematická viskozita kovu ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Podle literatury [2] se hodnota Reynoldsova čísla ve vtokových soustavách pohybuje kolem 15 000 až 20 000, ale může být i vyšší, což značí, že se jedná o turbulentní proudění. Vložením filtru do vtokové soustavy se značně sníží rychlost a turbulence taveniny viz obr. 6, Reynoldsovo číslo se snižuje na hodnoty kolem 700 až 1 000, tedy až 20x. Filtr působí i sekundárně na snížení zdroje vad ve vlastní vtokové soustavě. [1,2,3,4]

Při filtraci oceli je několik způsobů, jak umístit filtry do vtokové soustavy. U malých odlitků je možné provést předformování komůrky, do které se vloží filtr. [1]



Obr. 6 Uklidnění turbulence kovu filtrem [20]

2.2 Filtrace těžkých ocelových odlitků

K filtraci těžkých odlitků jsou určeny speciální filtrační komplety. Tyto komplety jsou většinou složeny ze spodní a horní části tvarovky a z 5 až 7 vložených filtrů. [1,2,5,6,7]

2.2.1 Filtrační kazeta, rošt

Skládá se ze dvou keramických tvarovek, uvnitř nichž bývá 5 až 6 šikmo uložených zirkonových pěnových filtrů, viz obr. 7. Při průchodu taveniny dochází nejprve k předehřevu filtrů. Díky tomu je umožněn bezproblémový priming. Vyrábí se několik typů filtračních kazet (roštů), viz tab. 1. [5, 7]



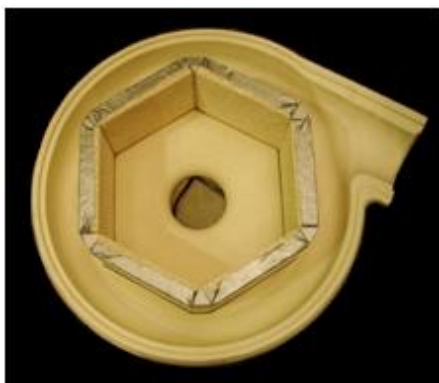
Obr. 7 Filtrační kazeta (rošt)

Tabulka 1 Technická data k filtračním roštům [7]

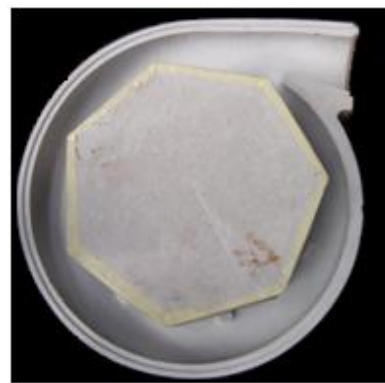
Typ <i>(počet a velikost vložených filtrů v palcových mírách)</i>	Vnější rozměr	Přípojný průměr	Celková hmotnost	Filtrační kapacita	Licí rychlost
	Mm	mm	kg	t	kg/s
Filtrační rošt 5x4"	120x170x540	Ø 60,80	12	1,0-1,5	35
Filtrační rošt 5x6"	195x200x795	Ø 60,80	30	3,0-3,5	80
Filtrační rošt 6x6"	220x200x960	Ø 80,100	40	4,0-5,0	100

2.2.2 Filtrační karusel, šnek

Skládá se z horní a spodní poloviny, vymezovacích klínů [6] nebo klece pro vložení zirkonových nebo hlinitan-uhlíkových pěnových filtrů. Tavenina proudí po boku tvarovky. Díky rotaci kovu po vnitřním obvodu stěn tvarovky se zvyšuje kapacita vložených filtrů o 20% až 50%. Zvýšení kapacity filtrace je zapříčiněno dokonalejším prohrátím a stálým omýváním vložených filtrů. Filtrační komplety se vyrábí v několika velikostech a typech viz tab. 2 a obr. 8 a 9. [1,2,5,6] Možnosti umístění filtračních karuselů jsou popsány a vyobrazeny v literatuře [24, 25]



Obr. 8 Filtrační karusel



Obr. 9 Filtrační šnek

Tabulka 2 Technická data k filtračním karuselům [6]

Typ <i>(počet a velikost vložených filtrů v palcových mírách)</i>	Přípojný průměr	Filtrační kapacita	Licí rychlost
	Mm	t	kg/s
Filtrační karusel 6/3"Q	Ø60	1	30 - 45
Filtrační karusel 6/4"Q	Ø80	2	60 - 120
Filtrační karusel 6/6"Q	Ø100	4	100 - 180
Filtrační karusel 6/8"Q	Ø120	8	150 – 300

3 NÁVRH METALURGIE A TECHNOLOGIE LITÍ ODLITKŮ

Odlitek nosiče lopatek, na kterém byla provedena zkouška filtrace oceli, měl chemické složení uvedené v tab. 3 [17,18] pro značku oceli ČSN 422742.6 (G17CrMo5-5 dle EN 10213). Následně byl tepelně zpracován na hodnoty dle normy EN 10213 uvedené v tab. 4. [17]

Tabulka 3 Chemické složení odlitku [17]

	Chemické složení v hmot. %												
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu	Sn	Ti
Min	0,15	0,50				1,00		0,45					
Max	0,20	1,00	0,60	0,025	0,020	1,50	Inf.	0,65	Inf.	0,04	Inf.	Inf.	<0,025

Tabulka 4 Tepelné zpracování a mechanické vlastnosti odlitku [17]

Tepelné zpracování		Tloušťka	Mechanické vlastnosti				
Normalizace [°C]	Popouštění [°C]	t [mm]	Zkouška tahem za teploty okolí			Zkouška rázem v ohybu	
			R _{p0,2} [MPa] min.	R _m [MPa]	A [%] min.	KV [J] min.	Teplota [°C]
920-960	680-730	≤ 100	315	490-690	20	27	20

Surová hmotnost odlitku: 15 300 kg [18]

Hrubá hmotnost odlitku: 9 000 kg [18]

Teplota lití: 1 570°C pro TP 18598-II a 1 550°C pro TP 18597-II [18]

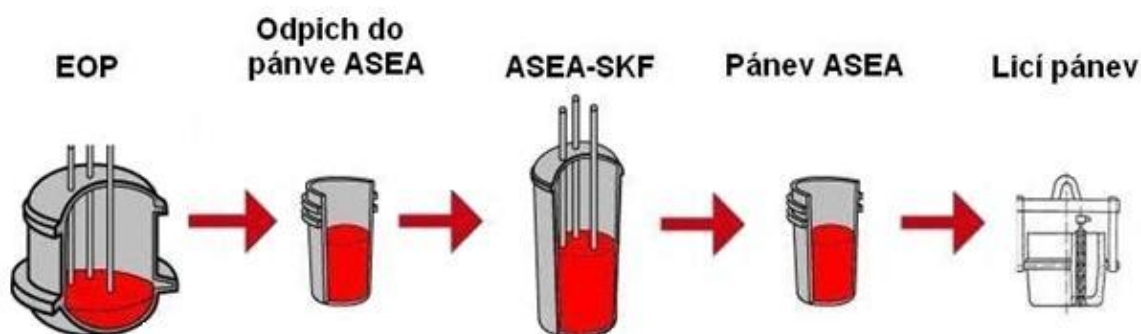
3.1 Návrh metalurgie

Pro porovnání rozdílů mechanických hodnot, průběhu plnění a jakosti povrchu filtrovaného odlitku TP 18598-II byl odlit i protikus TP 18597-II, který se nefiltroval. Celková hmotnost tavby byla 36 000 kg z důvodu minimální hmotnosti oceli v pánvi ASEA. Tavba proběhla na elektrické obloukové peci č. 5 se vsázkou 30% ocelového vratu s obsahem molybdenu cca 0,20% a 70% externího šrotu. Po natavení vsázky a dosažení teploty 1 640°C se provedl odpich do rafinační pánve, ve které se dokončila tavba v pánvové peci ASEA-SKF na předepsané hodnoty z tab. 3. Zpracovaná ocel se za teploty 1 635°C převezla z rafinačního zařízení na místo, kde byla přelita do dvou zátkových licích pánví s jednou výpustí:

20ti tunová pánev (M45) - hmotnost přelité oceli byla 15 300 kg a teplota 1 600°C,

30ti tunová pánev (M33) - hmotnost přelité oceli byla 19 700 kg a teplota 1 580°C.

Postup výroby oceli je znázorněn na obr. 10.



Obr. 10 Schéma postupu výroby oceli od EOP až k lící pánvi

3.2 Návrh technologie

Dřevěné modelové zařízení pro odlitek nosiče lopatek TP 18598-II, viz obr. 11 a 12, a přechodná změna TP 18597-II bylo vyrobeno dle postupového výkresu, na kterém byly zakresleny přídavky na opracování, technologické přídavky, nálitky, jádra, chladítka a vtoková soustava.

K zaformování bylo použito furanové směsi dvou druhů:

modelová směs - křemenný písek (SiO_2) a kyselě vytvrzovaná furanová pryskyřice

chromitová směs - chromitový písek ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) a kyselě vytvrzovaná furanová pryskyřice

Formovací směs byla připravována na mísiči typu WÖHR, kde se smísil regenerovaný chromitový nebo křemenný písek s furanovou pryskyřicí a vytvrzovačem. Formovací směs se převážela na místo formování v bedně určené k převozu a sypání směsi. Model s volnými částmi byl formován do rámců. Formování modelu probíhalo postupně tak, aby bylo možné vytvořit povrchovou vrstvu cca 50 – 80 mm z chromitové směsi, která byla v kontaktu s tekutým kovem, a zbytek formy se dosypal modelovou směsí. Po 4-5 hodinách byla forma otočena a vyjmut model s volnými částmi. Po vytažení modelu z formy bylo nutné ji zkontrolovat a případné nerovnosti opravit, následně celou formu 2x natřít zirkonovým nátěrem. Totéž se provedlo u jader. Po zaschnutí obou vrstev nátěru, se založila jádra do formy a skládání se zakončilo přiložením vršku.

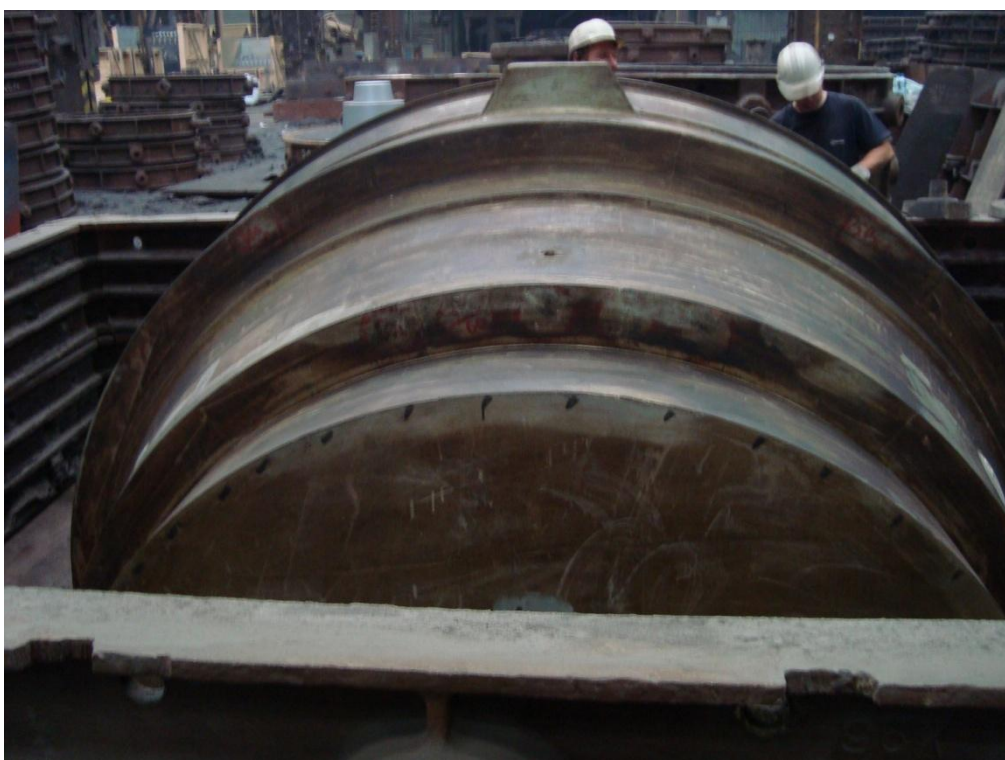
K zajištění formy proti vztlaku se použilo kvádrových závaží. Po zatížení formy bylo zahájeno horkovzdušné vyhřívání dutiny formy elektrickými kamny na teplotu 80 - 110°C. Vyhřívání se ukončilo 30 minut před odlitím formy. [18]

Odlití formy nosiče lopatek TP 18598-II, ve které byly zaformovány filtrační karusely, proběhlo jednou výlevkou Ø100 mm z 20ti tunové zátkové lící pánve M45 s hmotností tekutého kovu 15 300 kg a lící teplotou 1 570°C. V době, ukončení odlévání, se ošetřily nálitky exotermickým a poté izolačním zásypem. Tuhnutí a chladnutí odlitku probíhalo po dobu 4,5 dne. [18]

Odlití formy nosiče lopatek TP 18597-II se standardní vtokovou soustavou proběhlo jednou výlevkou Ø100 mm ze 30ti tunové zátkové lící pánve M33 s hmotností tekutého kovu 19 700 kg a lící teplotou 1 550°C. V době, ukončení odlévání, se ošetřily nálitky exotermickým a poté izolačním zásypem. Tuhnutí a chladnutí odlitku probíhalo po dobu 4,5 dne. [18] Ze zbytku v poslední přelité lící pánvi (cca 4 400 kg) se odlily speciální chladítka.



Obr. 11 Dřevěný model nosiče lopatek TP 18598-II

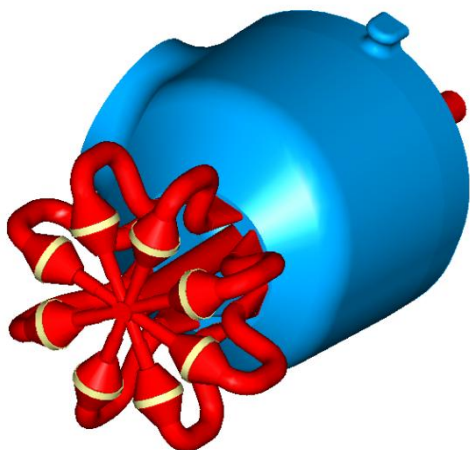


Obr. 12 Dřevěný model nosiče lopatek TP 18598-II

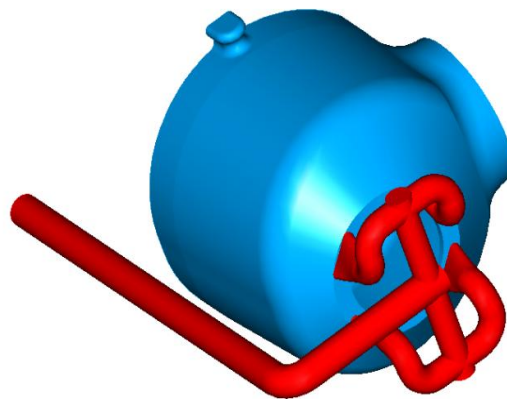
4 NÁVRH VTOKOVÉ SOUSTAVY A UMÍSTĚNÍ FILTRAČNÍCH KARUSELŮ

V předchozí době bylo v provozu slévárny vyzkoušeno několik druhů filtrů a vtokových soustav pro filtraci ocelových odlitků. Vtoková soustava byla složena vždy ze šamotových trubek a tvarovek. Odzkoušely se pěnové filtry z materiálu ZrO_2 (zirkonové) a $Al_2O_3 + C$ (uhlíkové) také byly zkoušeny keramické lisované filtry. Zkoušky filtrů se prováděly u odlitků se surovou hmotností do 6 000 kg. Používalo se filtrů vkládaných do speciálních tvarovek zařazených přímo do vtokové soustavy co nejbližší k budoucímu odlitku.

První zkouška filtrace byla provedena u odlitků komory regulačního ventilu (HR 17674 z.č. 19 a 20) o surové hmotnosti každého kusu 6 000 kg. Materiál obou filtrovaných odlitků byl GX12CrMoVNbN9-1. Vtoková soustava s filtry byla komplikovanější, viz obr. 13, oproti původní vtokové soustavě, viz obr. 14, a skládala se ze šamotových trubek, tvarovek Ø130/Ø55/Ø60/štěrbiny Ø110 a 8 zirkonových filtrů pro každý z odlitků o rozměrech Ø200 mm, tl. 35 mm a s pórovitostí 10 ppi. [18] Každý filtr měl mít dle výrobce [19] filtrační kapacitu 610 – 910 kg. Při odlévání mělo každým filtrem protéct 750 kg oceli. Tato zkouška neproběhla úspěšně. Vlivem vysoké výtokové rychlosti (až 6,3 m/s) a licím výkonu z pánve na jednu výlevku Ø100 (až 339 kg/s) došlo k prolomení filtrů již při zalití vtokové soustavy.



Obr. 13 Vtoková soustava s filtry



Obr. 14 Původní vtoková soustava

Další zkouška byla provedena na odlitku objímky (HR 17842 z.č.: 1 a 2) o surové hmotnosti 3 600 kg. Odlitek byl odlit z materiálu GS33NiCrMo7.4.4. Vtoková soustava byla provedena ze šamotových trubek a tvarovek Ø110/4xØ90. Do 4 tvarovek ve vtokové soustavě se vložily uhlíkové filtry Stelex Pro Ø200 mm a tl.: 35 mm s pórovitostí 10 ppi a filtrační kapacitou 610 – 910 kg/filtr. viz obr. 15 a 16. Při odlévání mělo každým filtrem protéct 900 kg oceli. Před litím byla forma vysušena horkovzdušnými kamny přes náletek na teplotu 80 – 110°C. Forma se odlévala za teploty 1 570°C. Po zalití vtokové soustavy došlo k postupnému filtrování oceli, ale během několika prvních vteřin, kdy ocel protékala filtry, došlo k jejich prohnutí a následnému prolomení. Při prolomení filtrů se zrychlilo plnění formy a na hladině se objevily rozlámané filtry, viz obr. 17 a 18.



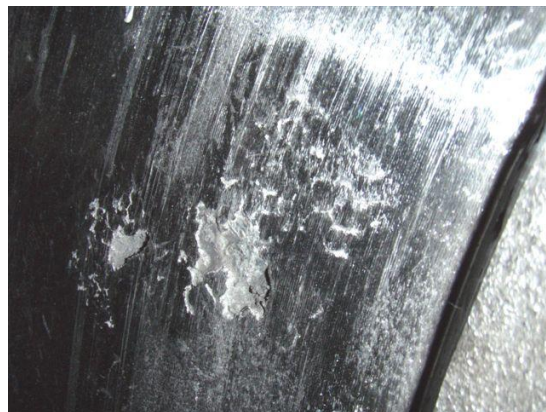
Obr. 15 Vtoková soustava s filtry



Obr. 16 Tvarovka s uhlíkovým filtrem



Obr. 17 Rozlomený filtr



Obr. 18 Rozlomený filtr v dělicí rovině odlitku

Od používání keramických lisovaných filtrů se odstoupilo po testu průtočnosti, kdy zkušební odlitek z materiálu 1) GS33NiCrMo744 a 2) GX12CrMoVNB9-1 nebyl odlit. Vždy se jednalo o protečení cca 10 kg tekuté oceli a následné zatuhnutí oceli ve filtru jak je ukázáno na obr. 19 a 20



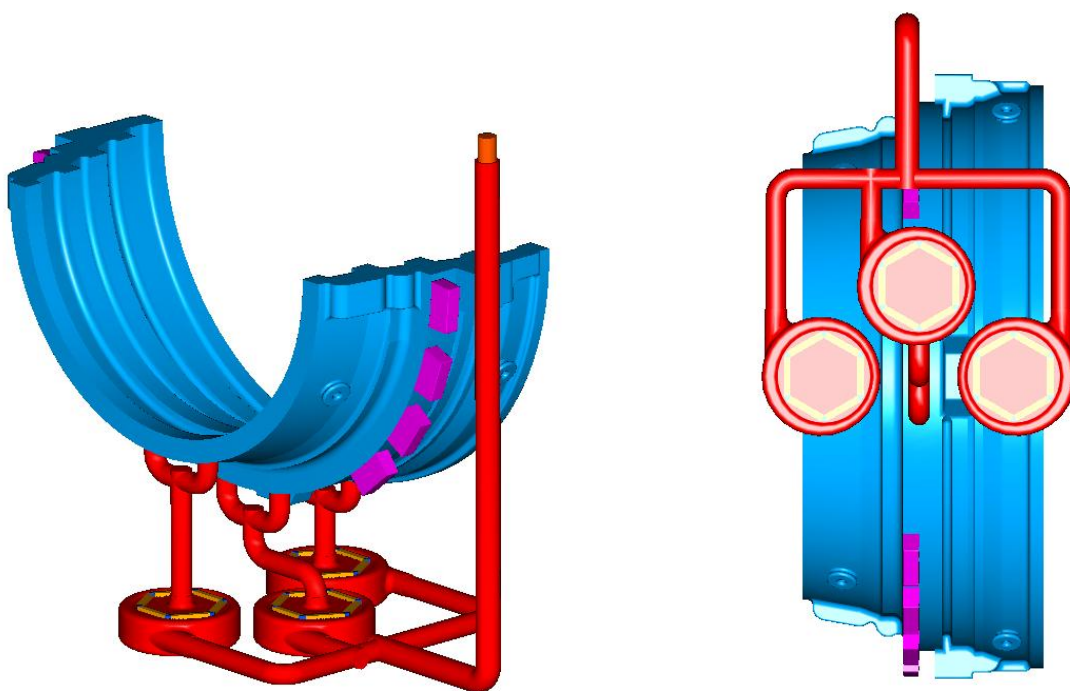
Obr. 19 Zatuhlá ocel 1) ve filtru



Obr. 20 Zatuhlá ocel 2) ve filtru

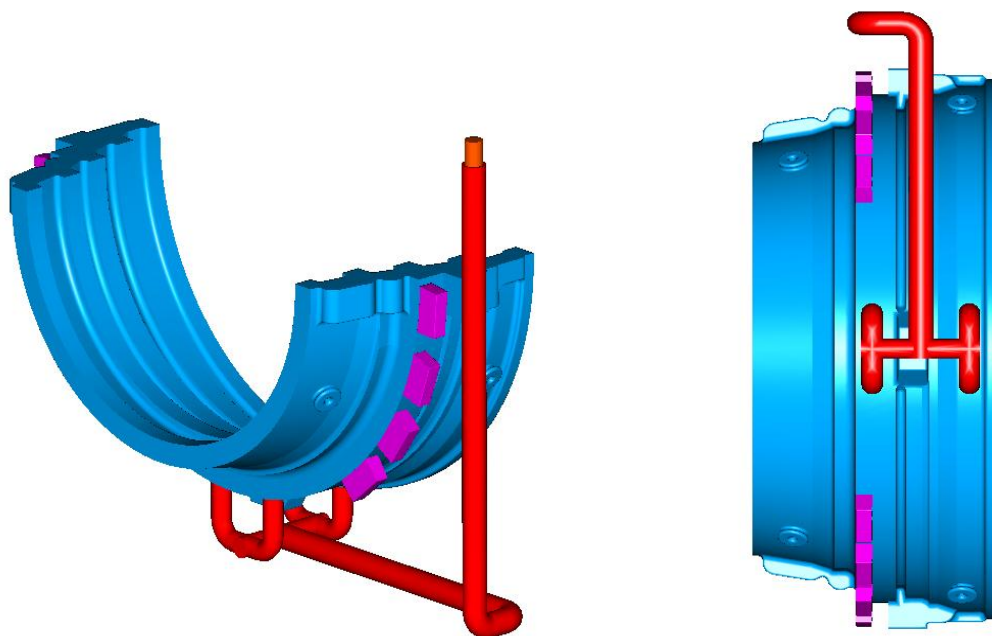
Po těchto neúspěšných zkouškách se upustilo od filtrování oceli přes filtry vložené přímo do tvarovky ve vtokové soustavě tak, aby vstupující ocel rozlámala filtry. V podmínkách slévárny PILSEN STEEL s.r.o. jsou používány licí pánve o velkých objemech tekutého kovu, tudíž i s vysokými licími výkony (kg/s). Díky této skutečnosti bylo nutné zvolit jinou metodu filtrování oceli. Metoda filtrace oceli pomocí filtračního karuselu od fa. Hi-Tech Ceramics byla nejpřijatelnější.

K ověření funkčnosti filtračních karuselů se vybral odlitek nosiče lopatek TP 18598-II. Bylo použito třech kusů 8" karuselů se šesti zirkonovými filtry UDICEL o rozměrech 203x203x38.1 mm. Výrobce udává, že každý z těchto filtračních karuselů může profiltrovat až 8 000 kg. Z důvodu první zkoušky tohoto systému filtrace ve slévárně PILSEN STEEL s.r.o. se použily tři karuselové filtrační komplety. Umístily se pod dutinou formy dle instalačních metod uvedených v literatuře [24] tak, aby vzdálenost mezi filtračním karuselem a dutinou formy byla co nejkratší. Vtoková soustava byla sestavena následovně: zaústění do dutiny formy z každého filtračního karuselu: 2x šamotová trubka Ø110, výstup z karuselového filtru: 1x šamotová trubka Ø110, vstup do karuselového filtru: 1x šamotová trubka Ø110, rozvod mezi licím kulem a karuselovými filtry: šamotová trubka Ø110 a 1x šamotová rozvodka 2x Ø110 / 1x Ø130, licí kůl: šamotová trubka Ø130, viz obr. 21. Hmotnost vtokové soustavy po zalití oceli dle předchozího popisu byla 1 940 kg.



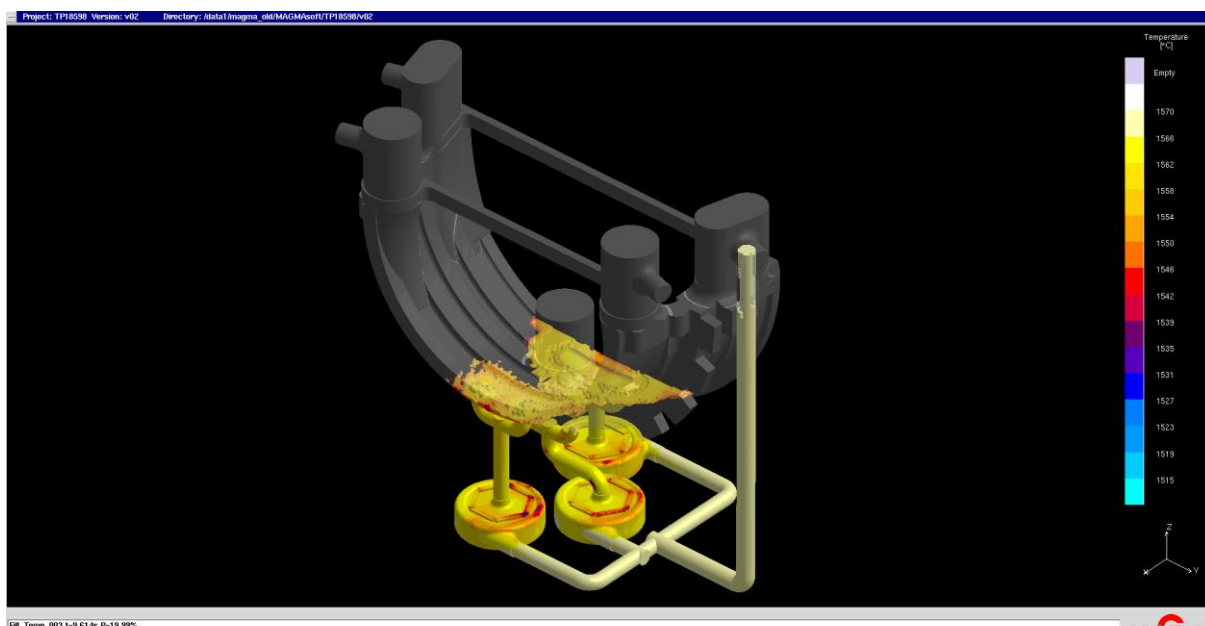
Obr. 21 Navrhovaná vtoková soustava s filtračními karusely

Původní vtoková soustava se sestavila následovně: zaústění do dutiny formy: 4x šamotová trubka Ø110, licí kůl: Ø130, viz obr. 22. Hmotnost vtokové soustavy po zalití oceli dle popisu byla 590 kg.

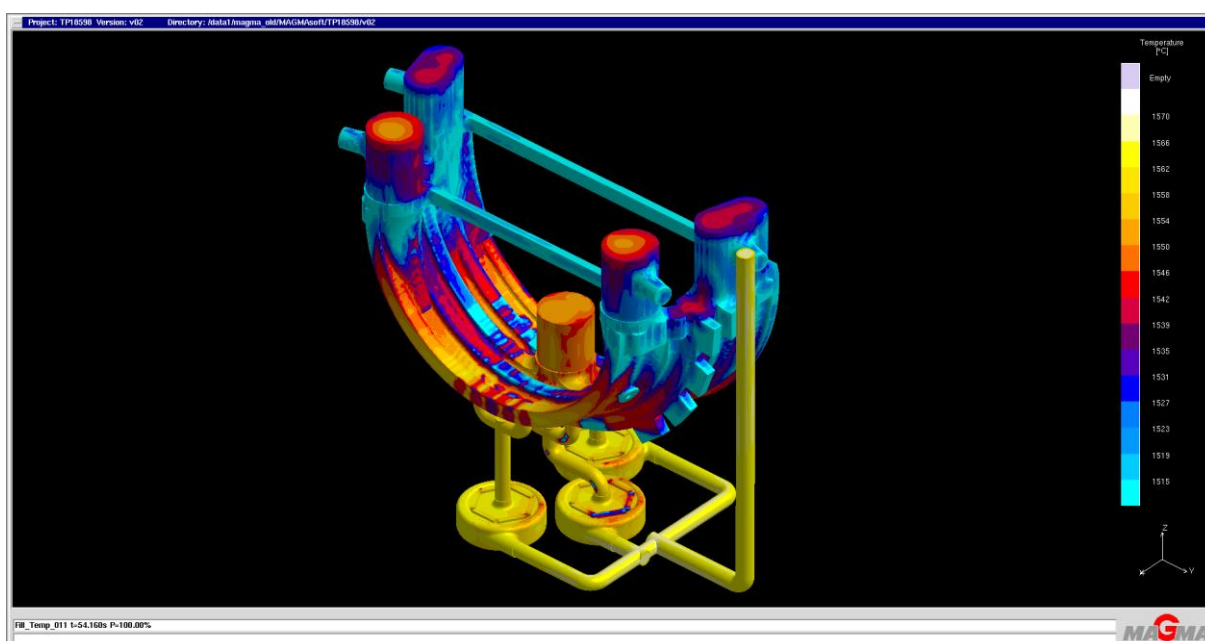


Obr. 22 Původní vtoková soustava

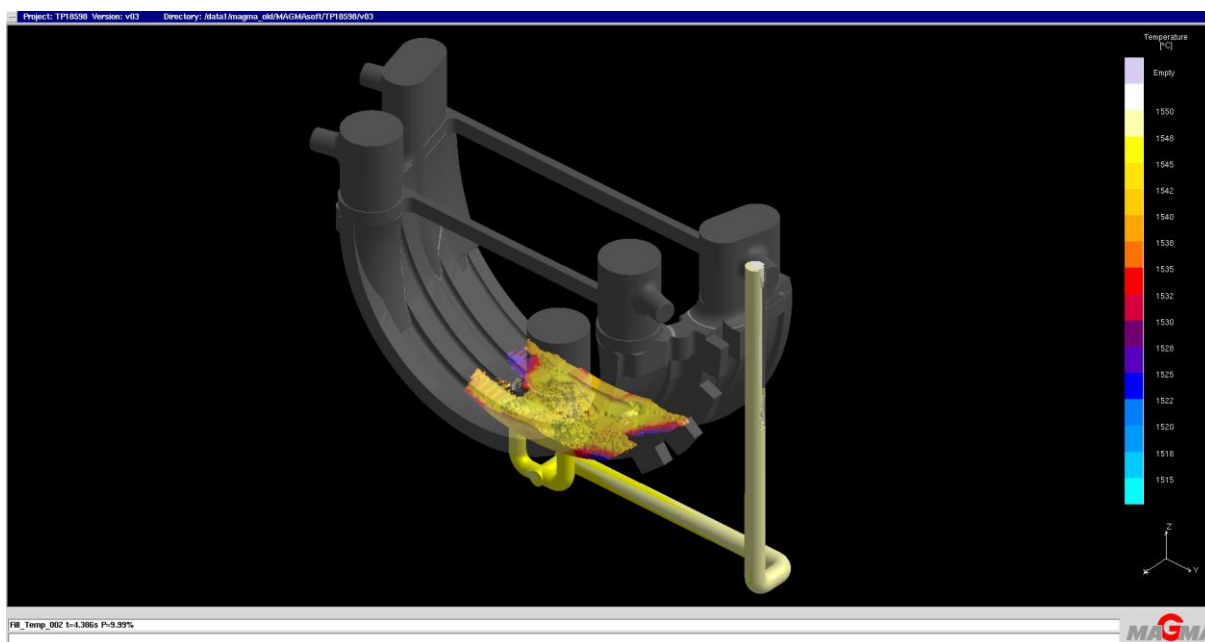
K porovnání rozdílů rozložení teplotních polí, proudění ve vtokové soustavě a plnění formy kovem s filtračními karusely a bez nich byl proveden výpočet na simulačním programu MAGMASOFT, viz obr. 23, 23a, 24, 24a.



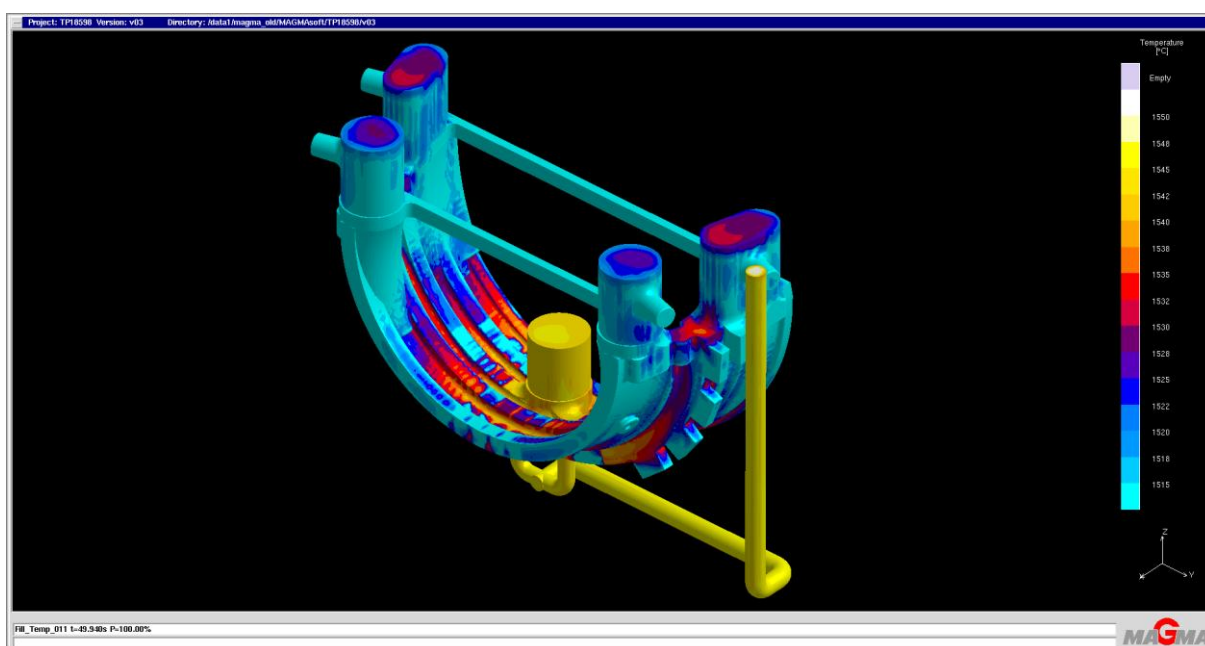
Obr. 23 Počátek plnění formy s karuselovými filtry, $t = 9,614$ s



Obr. 23a Rozložení teplotních polí po odlití, $t = 54,160$ s



Obr. 24 Počátek plnění formy s původním vtokem, $t = 4,386$ s



Obr. 24a Rozložení teplotních polí po odlití, $t = 49,940$ s

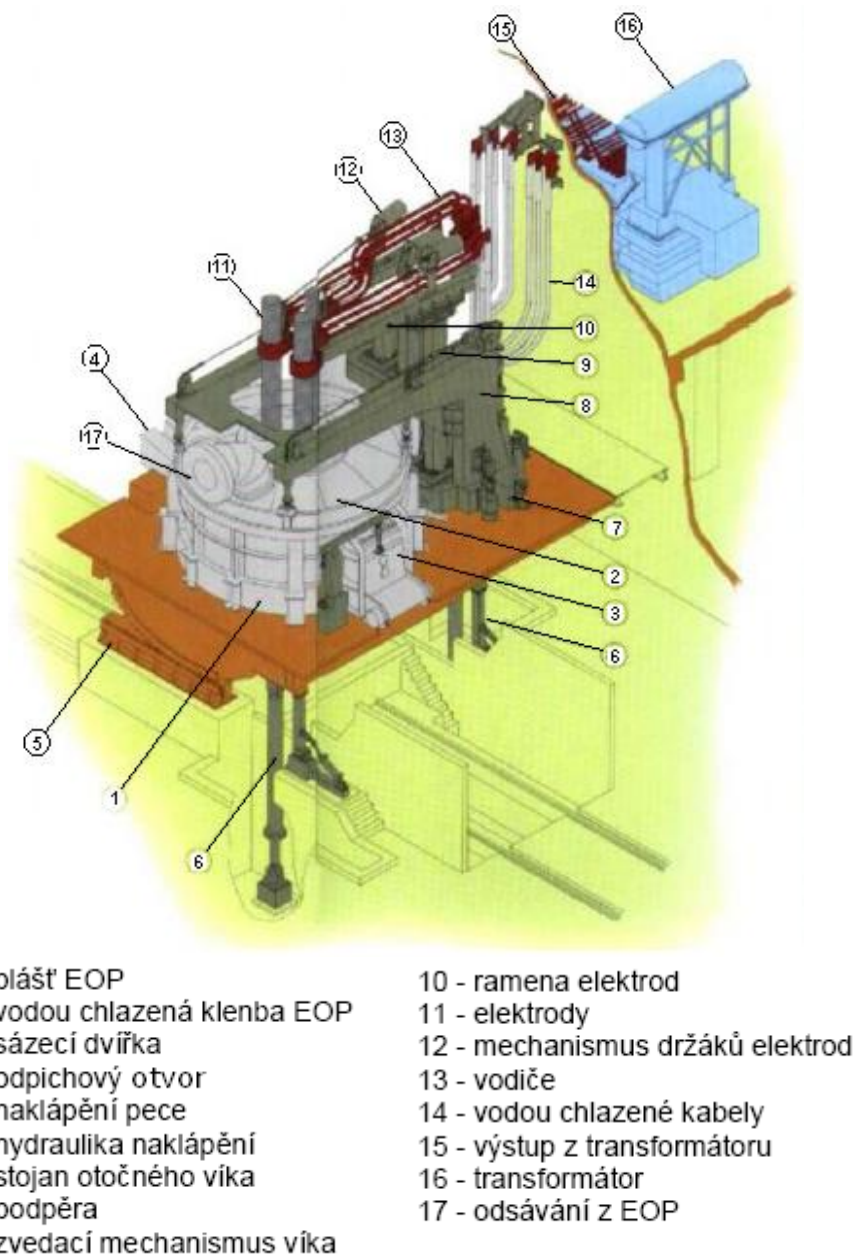
5 PROVEDENÍ TAVEB A ODLITÍ ODLITKŮ

Tavba oceli byla provedena na primárním tavicím agregátu a dohotovena na rafinačním zařízení. Odlití odlitků předcházelo přelévání oceli z rafinační pánve do licích pánví.

5.1 Zařízení, na kterých se ocel vyráběla

1. Elektrická oblouková pec č. 5 (EOP č. 5) viz obr. 25

V elektrické obloukové peci se taví většinou tuhá vsázka elektrickým obloukem, který hoří mezi třemi grafitovými elektrodami a vsázkou. Teplota hoření oblouků bývá 3 000°C až 4 000°C.



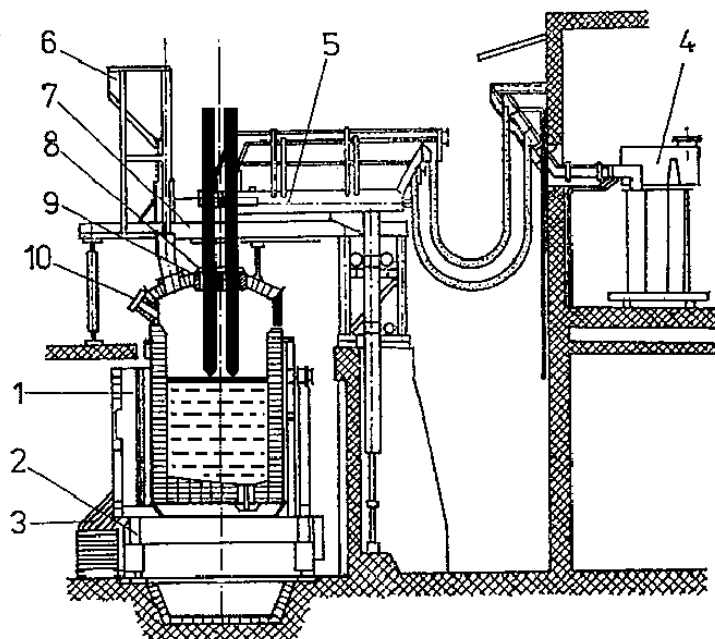
Obr. 25 Náskres zařízení elektrické obloukové pece

Pecní transformátor je připojen do sítě s napětím 22kV, který transformuje elektrickou energii na cca 160V – 290V. Vysokonapěťová část a pecní transformátor s tlumivkou jsou umístěny v transformátorové kobce. Pecní transformátor je chlazený vodou. Regulace výkonu transformátoru se provádí pomocí 23 odboček. Na pecní transformátor navazuje tzv. krátká cesta tvořená měděnými pásnicemi, které jsou zakončeny na vnější straně kobky u obloukové pece. Oblouková pec je připojena na pásnice vodou chlazenými měděnými lany připojenými na druhé straně na vedení v ramenech držáků elektrod. Elektroda je uchycena do držáku elektrod, který je chlazen vodou. Sevření elektrody v držáku je vyvoláno tlakem hydraulického válce. Grafitové elektrody bývají vyrobeny z vysoce jakostního kalcinovaného petrokoksu. Pohyb elektrod je řízen hydraulicky, je způsoben tlakem olejové emulze v hydraulických válcích. Držáky elektrod jsou pevně spojeny s písty pohybujícími se ve válcích. Víko pece je uchyceno na otočném, hydraulicky ovládaném sloupu, je chlazen vodou a upraveno k odsávání prachu a zplodin z tavení vsázky. Pecní nádoba (vlastní pec) je vyzděna vrstvou tepelně izolačního zdiva na bázi MgO-C a vybavena třemi kyslíko-palivovými hořáky. Půda (nístěj) se vyzdívá několika vrstvami tvárnice. Na tvárnice se dusá na sucho vibrátorem vrstva magnezitového slínku bez pojiva. V nístěji jsou umístěny tři porézní kameny, přes které se při tavení dmýchá argon nebo dusík. Bezstruskový odpich natavené vsázky se provádí odpichovým otvorem v pecní nádobě, který je osazen hydraulickým šoupátkovým mechanismem. Celá pec je umístěna na dvou kolébkách a na podstavci na kterém se naklápí. K elektrické obloukové peci patří zařízení k odprašení, chladicí věže na chlazení chladicí vody a ovládací místnost odkud se řídí celý proces primárního natavování. [8,9,10]

2. Rafinační zařízení ASEA-SKF

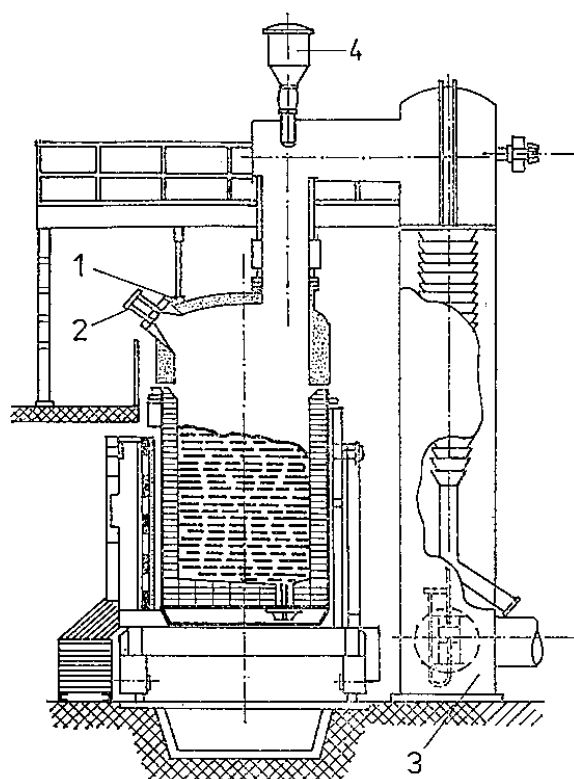
Zařízení ASEA-SKF bylo vyvinuto ve Švédsku. Jedná se o pánvovou pec s víkem ohřevu, víkem vakua a pánvovým vozem s indukčním míchačem, viz obr. 26 a 27. Způsob zušlechťování oceli se zásadně odlišuje od všech ostatních metod ohřevu a vakuování oceli. Rafinační zařízení ASEA-SKF slouží k výrobě oceli s nejvyššími požadavky na vnitřní jakost finálního výrobku – výkovku či odlitku. Vysoká jakost oceli vyrobené v rafinačním zařízení ASEA je dána vysokou efektivností jednotlivých rafinačních operací. Rafinovaná ocel mívá velmi nízké obsahy škodlivých prvků: síry, kyslíku a vodíku. Při použití jakostní vsázky a při dobré práci primárního pecního agregátu bývají velmi nízké i obsahy fosforu a dalších doprovodných prvků (měď, cín, arzén, antimon). V případě potřeby se zařízení ASEA využívá rovněž jako udržovací pánvová pec pro soustředění dostatečného množství kovu k odlití větších odlitků či kovářských ingotů.

K ohřevu lázně je rafinační zařízení vybaveno pecním transformátorem, víkem ohřevu se třemi elektrodami a odsáváním prachu a zplodin. Pod ohřívacím víkem se leguje, ohřívá, modifikují nekovové vměstky kalcem a homogenizuje se teplota za neustálého míchání indukčním míchačem a argonem. Vakuování taveniny se provádí za použití několikastupňové parní vývěvy a vakuového víka. Pod víkem dochází k vakuovému odplynění a vakuové dezoxidaci (VCD). [8,11]



1 — indukční míchač; 2 — přepravní vůz; 3 — ohebné vodou chlazené kabely; 4 — pecní transformátor; 5 — držák elektrod; 6 — zásobník pro dávkování legovacích přísad; 7 — zařízení pro zdvihání klenby; 8 — těsnění; 9 — vodou chlazený kroužek; 10 — kontrolní průzor

Obr. 26 Zařízení pro obloukový ohřev oceli při pochodu ASEA [21]



1 — kontrolní průzor; 2 — televizní kamera; 3 — vakuový systém s odlučovačem prachu a chladičem plynů; 4 — zásobník pro dávkování legovacích a dezoxidačních přísad

Obr. 27 Zařízení pro vakuování oceli při pochodu ASEA [21]

5.2 Vlastní provedení tavby

Tavba oceli na odlitky byla zahájena na elektrické obloukové peci č. 5, kde je postupně natavována vsázka složená z:

- ocelového vratu s obsahem cca 0,20% molybdenu
- ocelového šrotu
- dolomitu
- vápence
- vápna

Vsázka byla rozdělena na čtyři etapy vsázení. Prvním košem se vsadil těžký odpad, který byl zasypán druhým košem složeným z lehkého šrotu, struskotvorných přísad a potřebného množství nauhličovadla. Následující koše jsou připraveny ze zbylého množství lehkého šrotu. Během natavování je slévána struska z pece, což má rozhodující vliv na obsah fosforu v oceli.

Po natavení celé vsázky se vsadí další koš. Takto se postupovalo až do natavení předepsaného množství tekutého kovu. Při vsázení dalších košů se již použily kyslíko-palivové hořáky, které pomáhaly s natavováním vsázky. Podle potřeby se použila tryska k injektáži uhlí, aby proběhlo napětění strusky a zabránilo se sálání oblouku na stěny pece a aby všechna energie přecházela do roztavené oceli. Po natavení vsázky a ohřátí lázně na teplotu 1 561°C byla nabrána první zkouška. Podle rozboru zkoušky se řídil další průběh oxidace. Deset minut před odpichem se změřila aktivita kyslíku. Těsně před odpichem byla odebrána poslední zkouška a dle obsahu uhlíku bylo zvoleno množství hliníku k následné desoxidaci oceli v pánvi. [8,9,10,12,]

Po odpichu oceli z elektrické obloukové pece, viz obr. 28, byla pánev převezena, viz obr. 29 do rafinačního zařízení ASEA-SKF, viz obr. 30. Bezprostředně po zajetí pod víko ohřevu se provedlo měření teploty přelité surové oceli. Naměřila se teplota 1 590°C.



Obr. 28 Odpich z EOP č. 5



Obr. 29 Převážení pánve ASEA



Obr. 30 Rafinační zařízení ASEA – SKF

Následoval obloukový ohřev, po přelití surové oceli do pánve ASEA. Ohřev byl proveden s nejvyšším příkonem transformátoru. Ocel se v průběhu celé rafinace promíchávala indukčním míchačem v kombinaci s dmýcháním argonu. Při dosažení teploty 1 610°C byla odebrána reprezentativní zkouška kovu pro analýzu. V průběhu následného dohřevu se provedlo podle výsledku předchozí zkoušky dolegování tavby. Po odebrání zkoušky se pokračovalo v ohřevu tavby na teplotu 1 630°C pro vakuové zpracování na rafinačním zařízení ASEA – SKF. S pánvovým vozem bylo přežeto pod víko vakua. Probíhalo odplynění oceli – docházelo ke snížení obsahu kyslíku, vodíku a dusíku při současném odsíření oceli. Vakuování probíhalo 15 minut za tlaku pod 1torr (133,3 Pa). Pánvový vůz se po vakuování převezl pod víko ohřevu a nabrala se zkouška pro konečnou analýzu. Chemické složení poslední analýzy je uvedeno v tab. 5. Lázeň byla upravena na teplotu odpichu, tj. 1635°C. Po vyjetí vozu z ohřívacího víka se odvezla rafinační pánve na místo, kde došlo k přelití rafinované oceli do licích pánví, viz obr. 31. [11,13]



Obr. 31 Přelévání oceli z rafinační pánve do dvou licích pánví

M45 - hmotnost přelité oceli je 15 300 kg a teplota 10 minut po přelití 1 600 °C,
M33 - hmotnost přelité oceli je 19 700 kg a teplota 15 minut po přelití 1 580 °C.
Technologický zbytek v rafinační pánvi je 1 000 kg. [14,15,16]

Tabulka 5 Chemické složení tavby [13]

Chemické složení v hmot. %													
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu	Sn	Sb	N
0,19	0,65	0,35	0,007	0,002	1,28	0,22	0,47	0	0,0184	0,11	0,007	0,0027	0,054

5.3 Odlití odlitků

Odlitek nosiče lopatek TP 18598-II, zalité číslo 104112 byl odlit z 20ti tunové lící pánve M45 přes filtrační karusely, viz obr. 32, za teploty 1 570°C – z důvodu nízké zkušenosti s filtrací oceli v provozu slévárny bylo zvoleno přehřátí o 20°C oproti odlitku odlévanému bez filtrace. Kov plnil formu po dobu 2 min 21 s. Odlití proběhlo úspěšně. Po ukončení odlévání, byly ošetřeny všechny nálitky exotermickým a poté izolačním zásypem. Následovalo tuhnutí a chladnutí odlitku po dobu 4,5 dne.



Obr. 32 Odlévání odlitku nosiče lopatek TP 18598-II

Druhý odlitek nosiče lopatek TP 18597-II, zalité číslo 104111 byl odlit z 30ti tunové lící pánve M33 přes původní vtokovou soustavu za teploty 1 550°C. Kov plnil formu po dobu 1 min. 56 s. s mírným rozstříkem na stěnu kolem vtoku. Odlití proběhlo úspěšně. Po ukončení odlévání, byly ošetřeny všechny nálitky exotermickým a poté izolačním zásypem. Následovalo tuhnutí a chladnutí odlitku po dobu 4,5 dne. [14,15,16]

Ze zbytku v lící pánvi M33 (4400 kg) byly odlity speciální chladítka. [14,15,16]

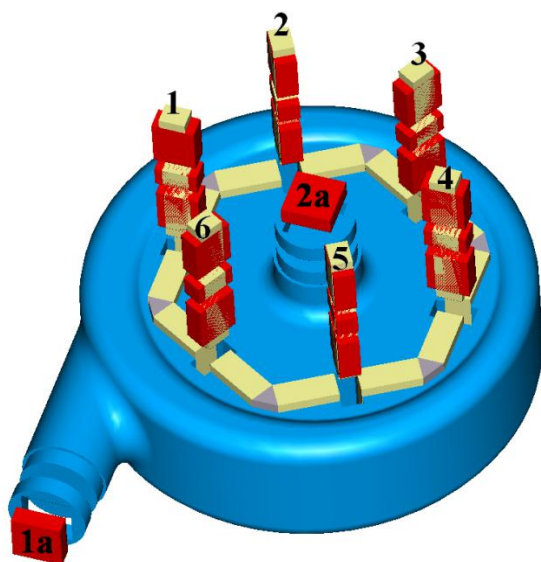
6 ROZBOR MIKROČISTOTY OCELI A JAKOSTI POVRCHU ODLITKŮ

Odlitky nosiče lopatek TP 18597-II a TP 18598-II dosáhly za 4,5 dne teploty, při které je bylo možné vytrhnout z formy. Po vytržení obou odlitků následovalo okopání zbytkového formovacího materiálu a za zbytkového tepla byla odpálena vtoková soustava.

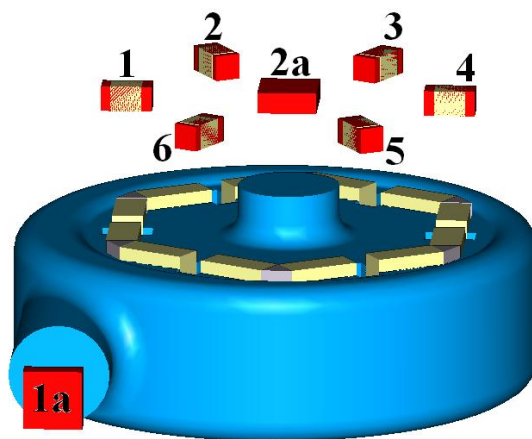
Očištěné odlitky od formovacího materiálu a zbavené vtokových soustav byly převezeny do žhací pece na náhřev pro pálení nálitků. Po upálení nálitků následovalo tepelné zpracování na hodnoty uvedené v tab. 4. Tryskání povrchu obou odlitků následovalo po režimu tepelného zpracování.

6.1 Rozbor mikročistoty oceli

Zkoumání mikročistoty oceli bylo uskutečněno na vtokové soustavě s filtračními karusely. Z filtračního karuselu, který byl umístěn pod největším průměrem odlitku, bylo odebráno 8 zkušebních vzorků dle rozřezového plánu viz obr. 33 a 34.

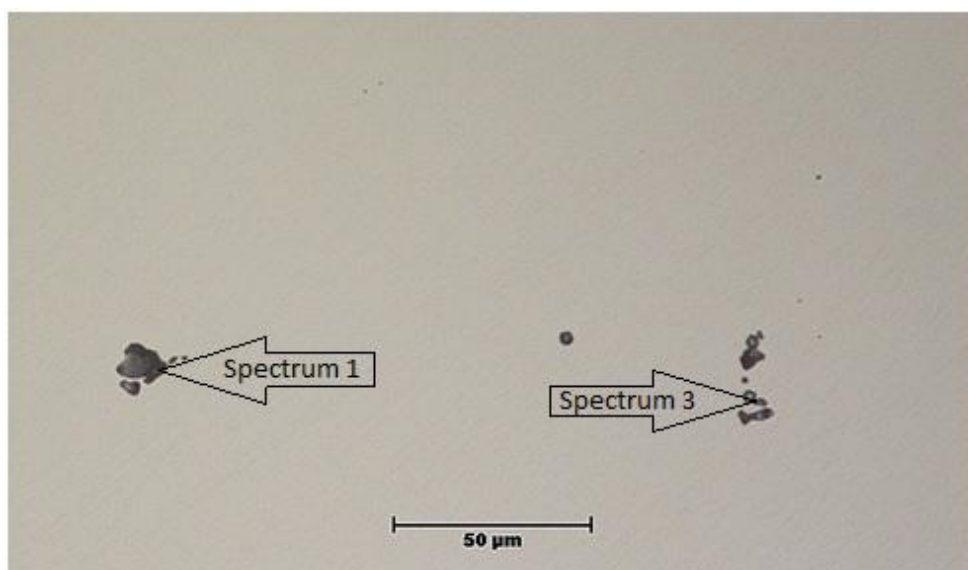


Obr. 33 Rozřezový plán

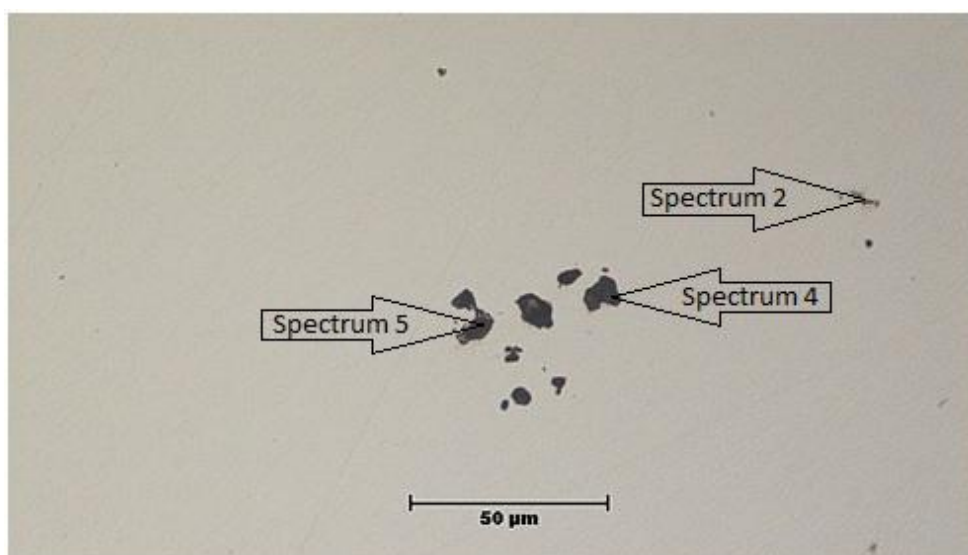


Obr. 34 Očíslované zkušební vzorky

Vzorek 1a byl odebrán 30 mm před vstupem kovu do filtračního karuselu a měl rozměry: 70 mm x 70 mm x 30 mm. Vzorek 2a byl odebrán 30 mm za výstupem kovu z filtračního karuselu a měl rozměry: 70 mm x 70 mm x 30 mm. Tyto vzorky měly demonstrovat čistotu oceli na vstupu do filtračního karuselu a na jeho výstupu. Obsahy vměstků byly zkoumány na optickém mikroskopu NICON Epiphot 300 viz obr. 35 až 38. Dále bylo zkoumáno chemické složení vměstků elektronovou mikroanalýzou na rastrovacím elektronovém mikroskopu REM JEOL JSM 6490LV – INCA 300 viz tab. 6 a 7.



Obr. 35 Vzorek 1a zvětšeno 1500x

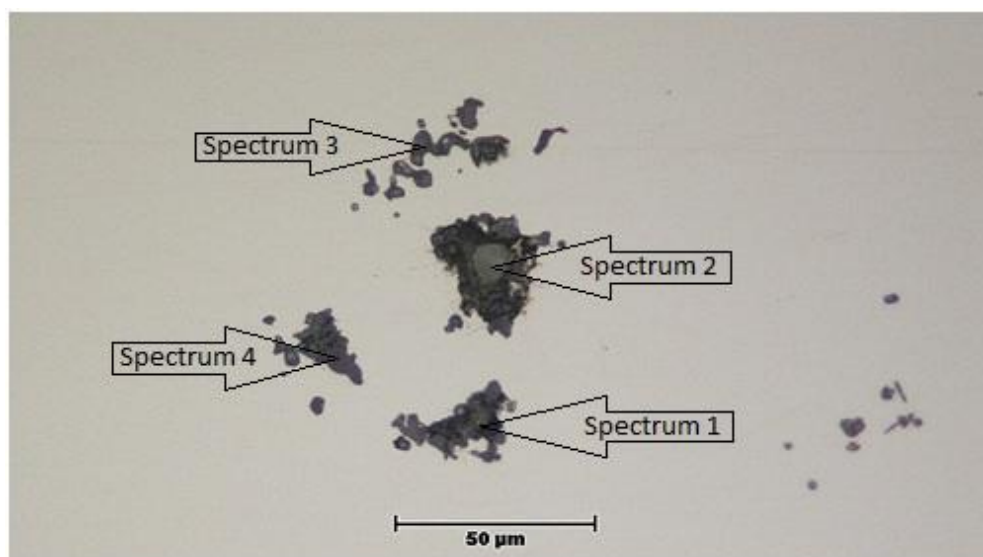


Obr. 36 Vzorek 1a zvětšeno 1500x

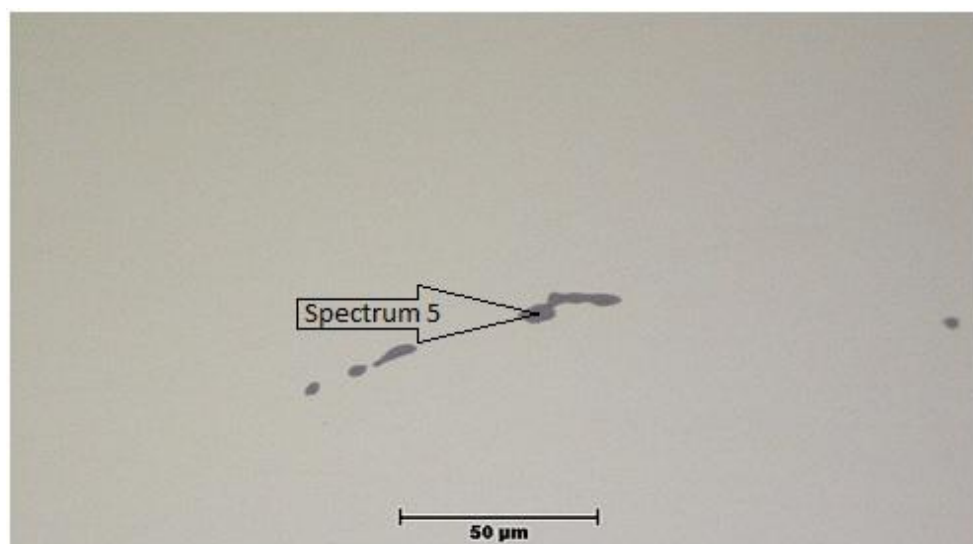
Tabulka 6 [22]

Prvkové složení v hm. %

Spectrum	O	Mg	Al	S	Ca	Mn
Spectrum 1	55.0	1.2	43.8			
Spectrum 2				38.7		61.3
Spectrum 3	49.4	2.0	36.9	4.4		7.3
Spectrum 4	52.9	2.7	42.4	1.1		0.9
Spectrum 5	51.3	1.1	43.5		4.2	



Obr. 37 Vzorek 2a zvětšeno 2500x



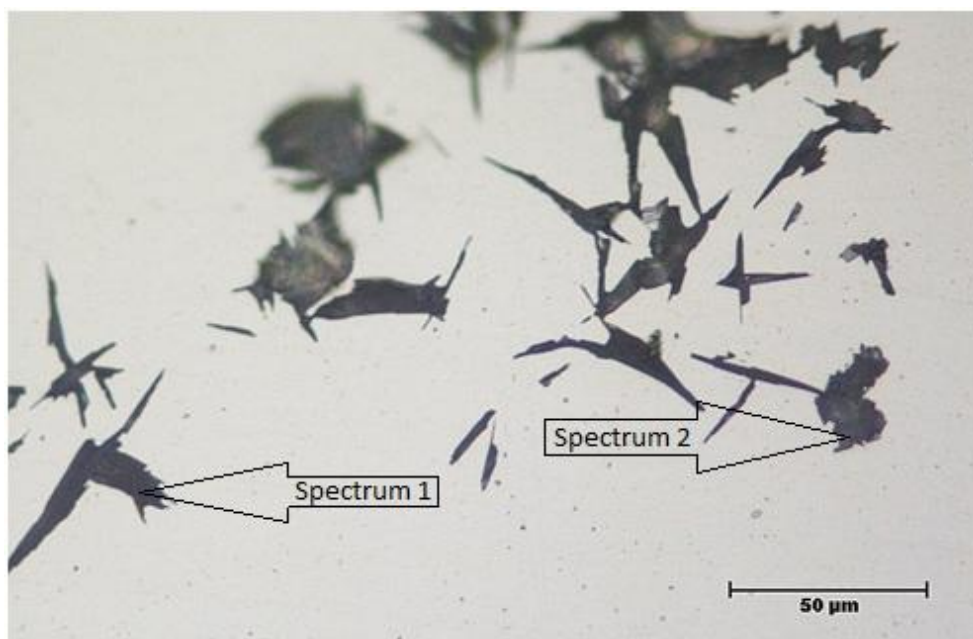
Obr. 38 Vzorek 2a zvětšeno 2500x

Tabulka 7 [22]

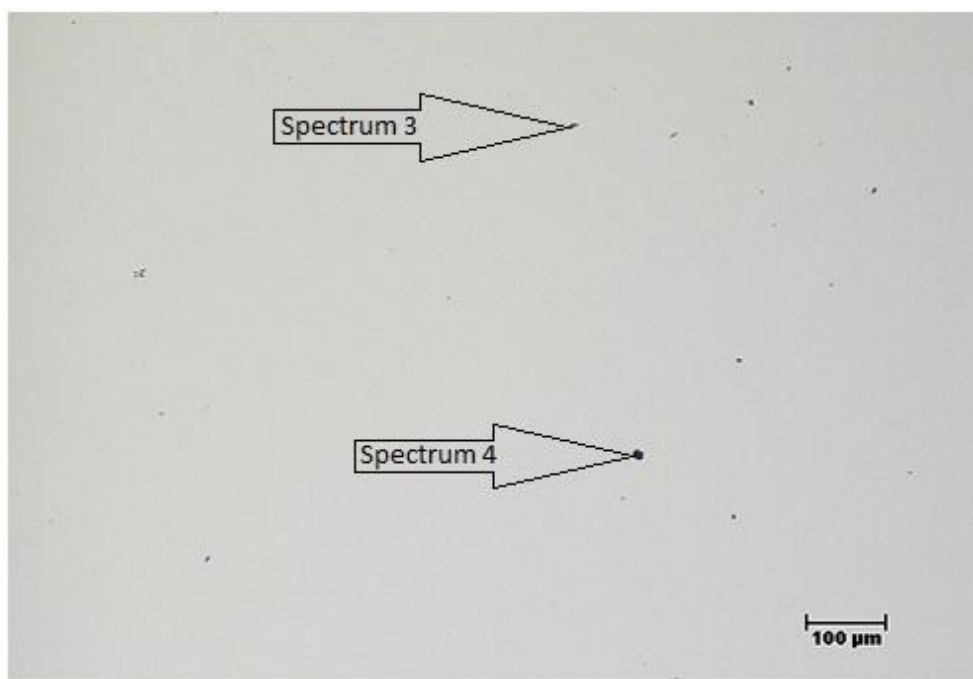
Prvkové složení v hm. %

Spectrum	O	Mg	Al	S	Mn
Spectrum 1	53.7		40.1	2.6	3.6
Spectrum 2	51.9	5.3	40.3	1.4	1.1
Spectrum 3	53.4	1.6	45.0		
Spectrum 4	53.5	1.6	44.9		
Spectrum 5				39.6	60.4

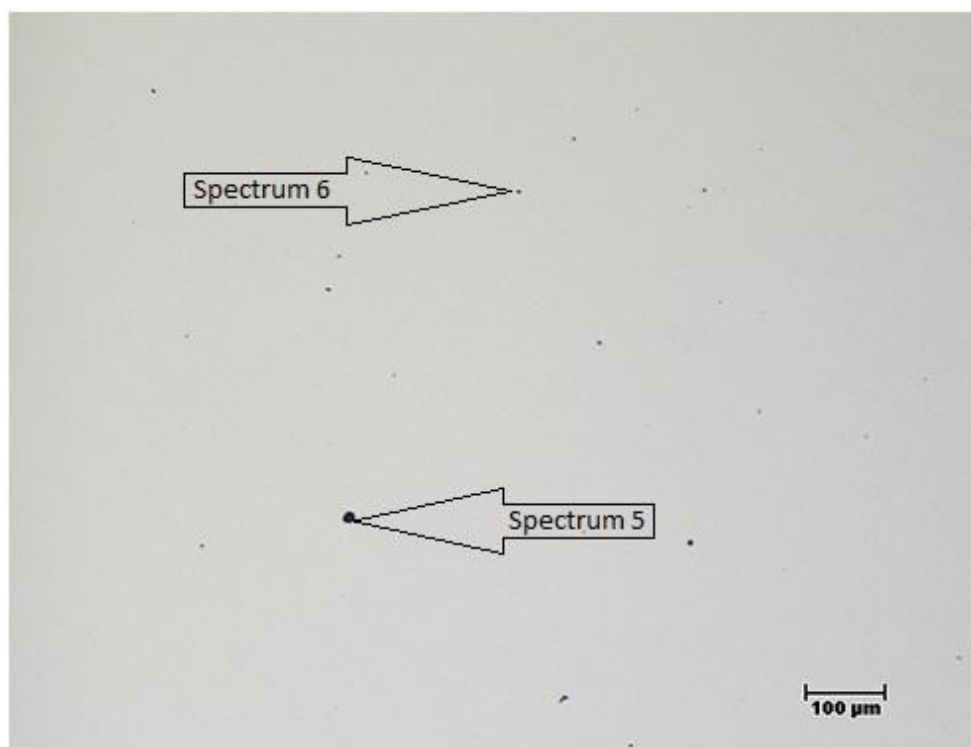
Vzorky 1 až 6 byly odebrány a označeny dle rozřezového plánu. Rozměry vzorků odebraných z filtračního karuselu byly: 30 mm x 30 mm x 60 mm. Vzorky se očíslovaly dle pořadí, jak byly oplachovány roztavenou ocelí. Každý vzorek byl označen pořadovým číslem a směrem průtoku taveniny filtrem písmeny P (před filtrem – vstup taveniny) a Z (za filtrem – výstup taveniny). U každého vzorku byla zkoumána nejvíce znečištěná místa před filtrem, uvnitř filtru a za filtrem viz obr. 39 až 56, chemické složení zachycených vměstků viz tab. 8 až 13. Ke zkoumání mikročistoty oceli těchto vzorků bylo použito stejných zařízení jako u předchozích vzorků.



Obr. 39 Vzorek 1P (ocel před filtrem) zvětšeno 500x



Obr. 40 Vzorek 1U (ocel uvnitř filtru) zvětšeno 100x

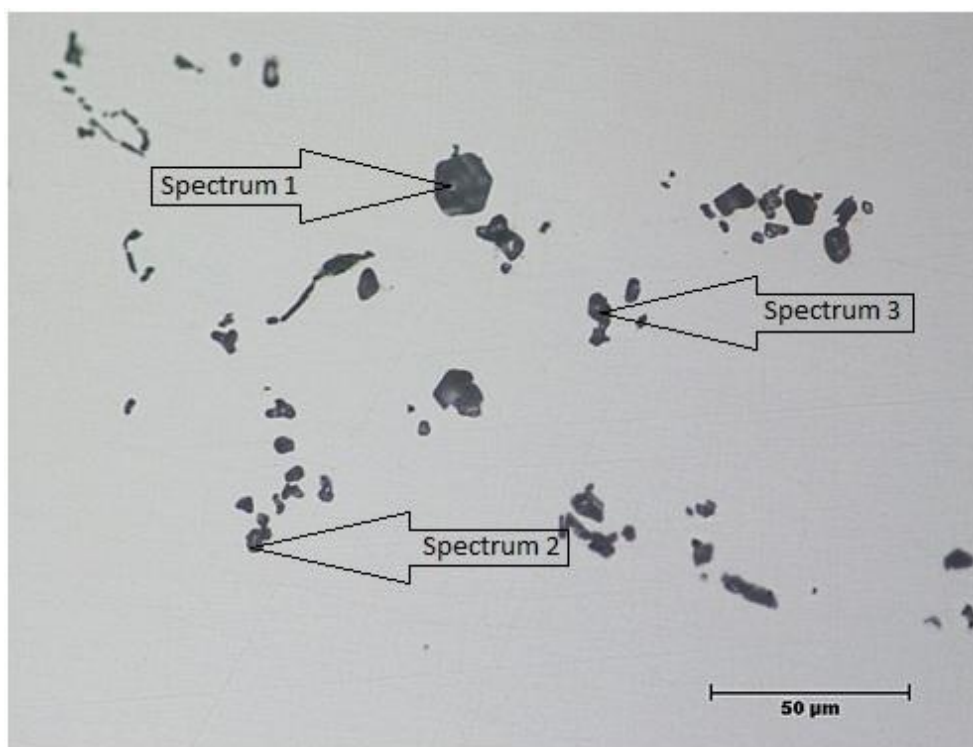


Obr. 41 Vzorek 1Z (ocel za filtrem) zvětšeno 100x

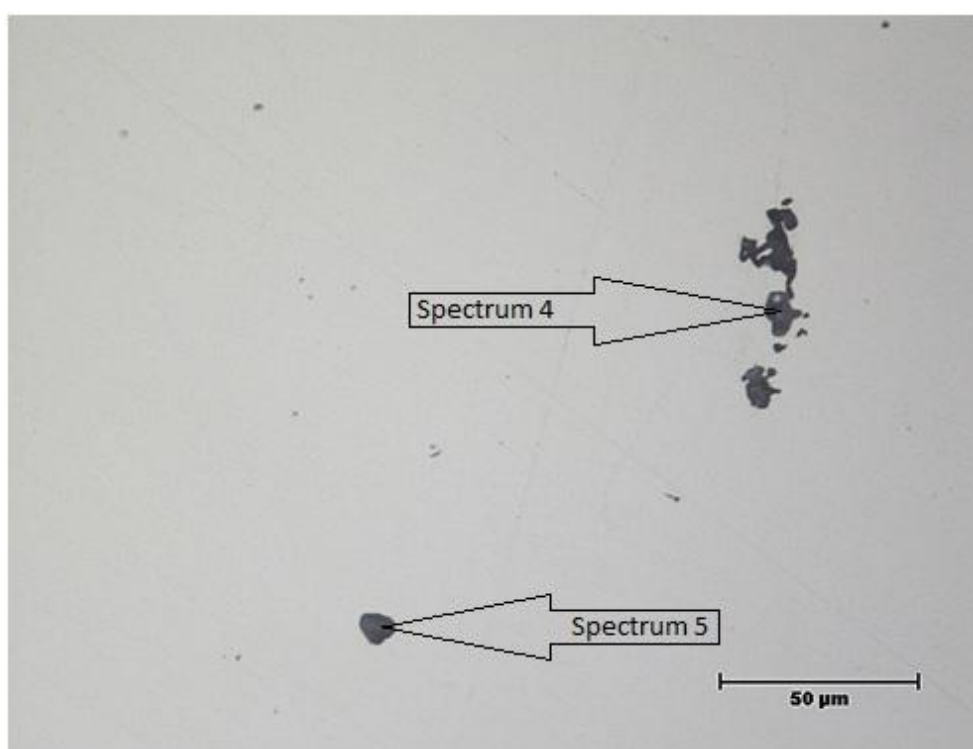
Tabulka 8 [23]

Prvkové složení v hm. %

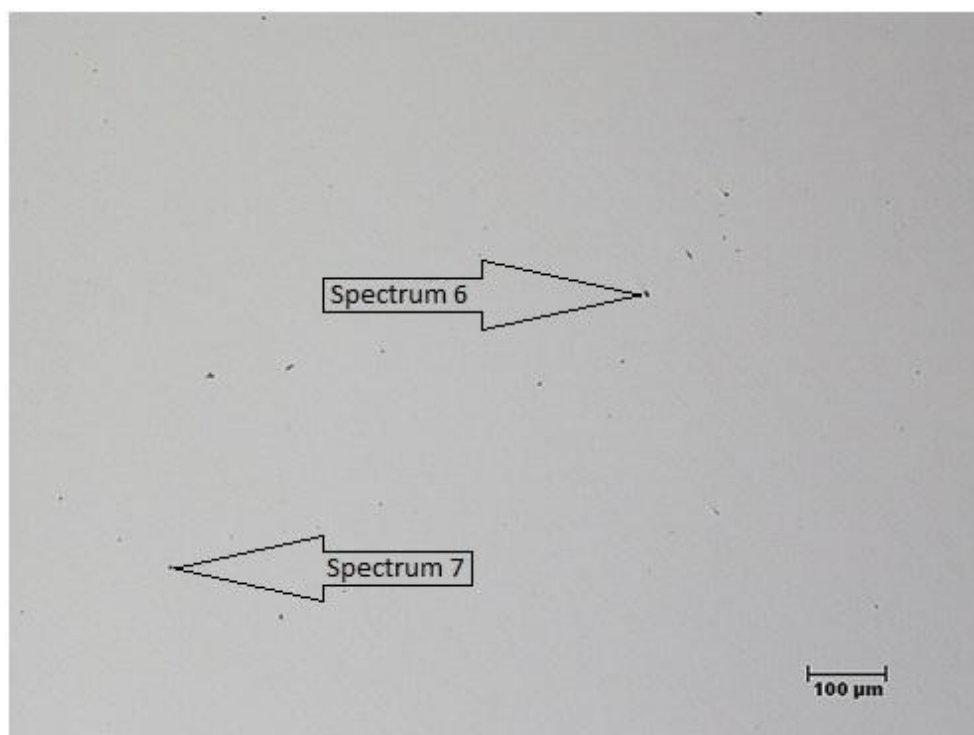
Spectrum	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Cr	Mn	Fe
Spectrum 1	50.55	0.59	29.77	7.55	0.36	9.33		0.72	1.14
Spectrum 2	31.78	0.49	25.55	1.03		2.95	0.76	0.73	36.71
Spectrum 3	23.42		19.56	0.59		2.00	1.09	0.71	52.64
Spectrum 4	53.24	1.56	40.89	1.36		1.37		0.66	0.92
Spectrum 5	32.75	0.80	33.01			1.38	1.02	2.59	28.46
Spectrum 6	42.59		40.47				0.56		16.38



Obr. 42 Vzorek 2P (ocel před filtrem) zvětšeno 500x



Obr. 43 Vzorek 2U (ocel uvnitř filtru) zvětšeno 500x

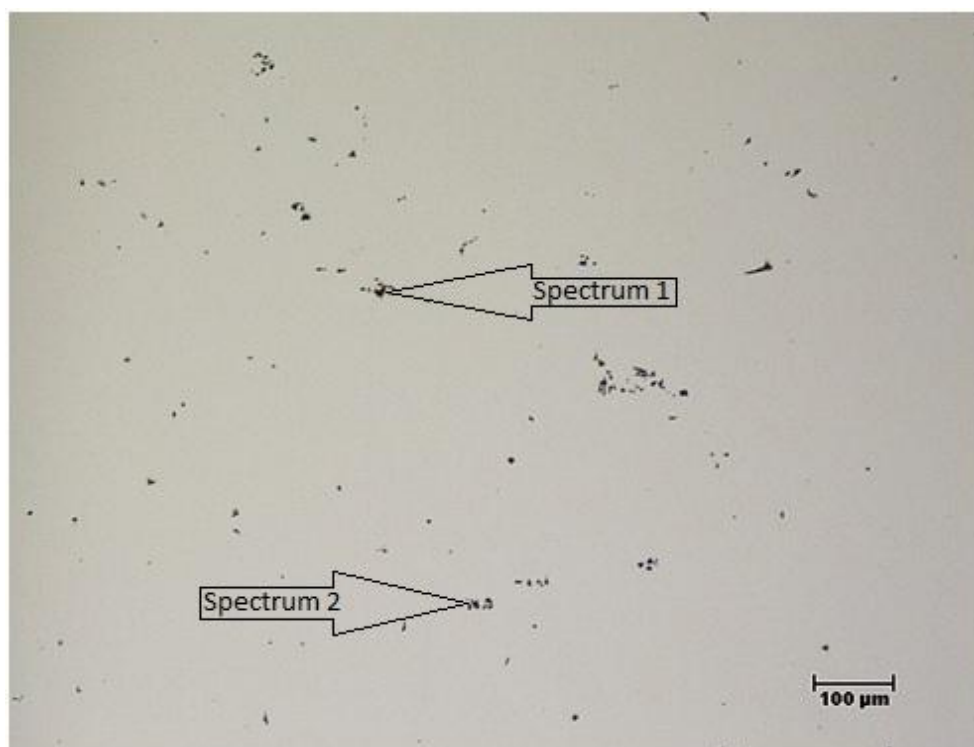


Obr. 44 Vzorek 2Z (ocel za filtrem) zvětšeno 100x

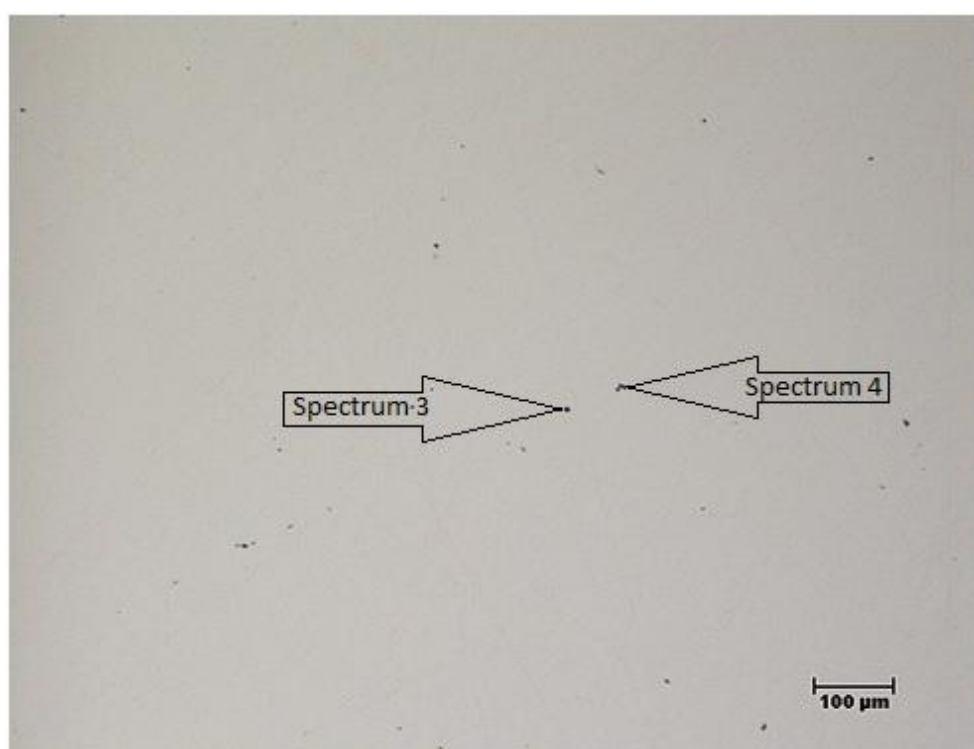
Tabulka 9 [23]

Prvkové složení v hm. %

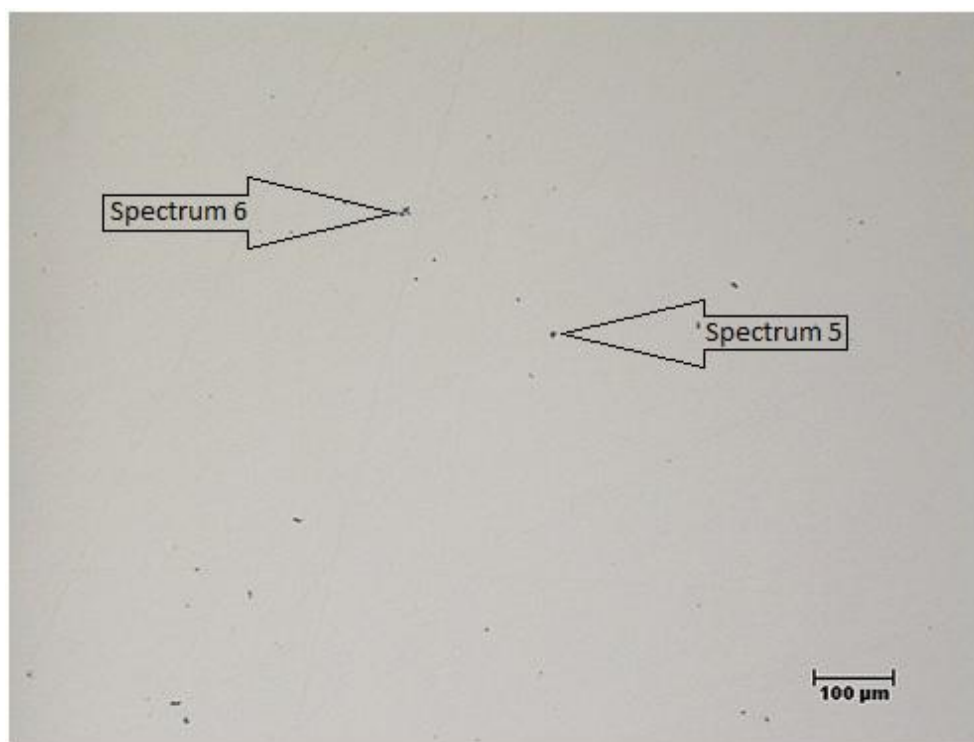
Spectrum	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe
Spectrum 1	48.00	1.30	43.00		2.60			3.60	1.50
Spectrum 2	30.00	4.10	24.20				0.70		41.10
Spectrum 3	22.40	1.10	27.60			2.00	0.80		46.10
Spectrum 4	21.50		6.80				0.90		70.80
Spectrum 5	51.50		45.40	1.30				0.50	1.30
Spectrum 6	31.80		30.70			2.90	0.70		33.90
Spectrum 7	46.50	8.90	35.70					0.90	8.00



Obr. 45 Vzorek 3P (ocel před filtrem) zvětšeno 100x



Obr. 46 Vzorek 3U (ocel uvnitř filtru) zvětšeno 100x

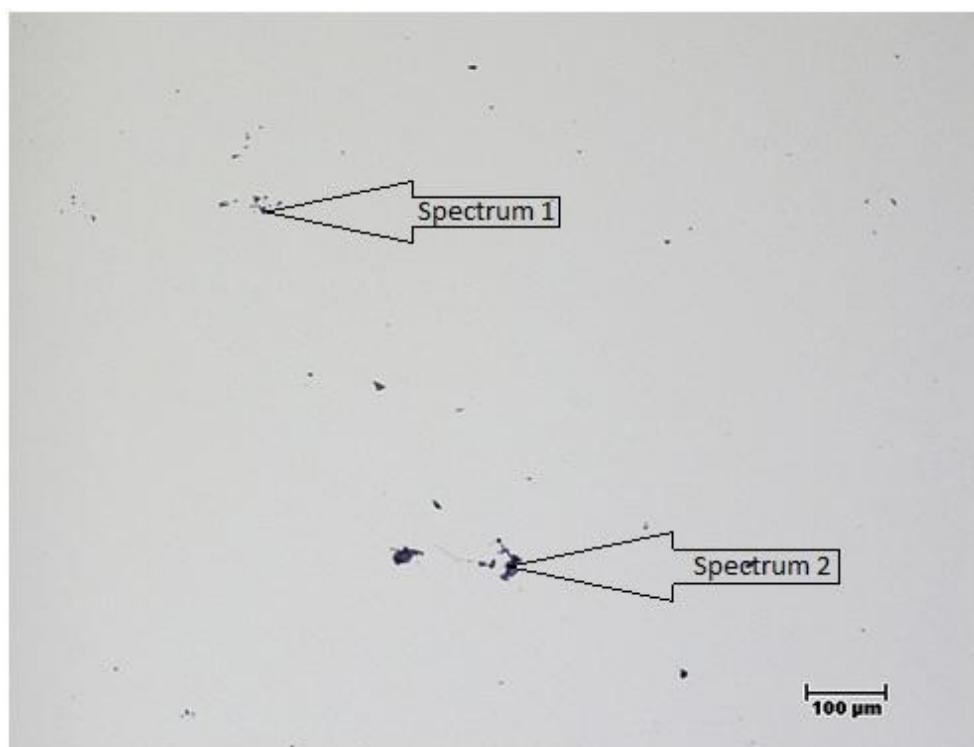


Obr. 47 Vzorek 3Z (ocel za filtrem) zvětšeno 100x

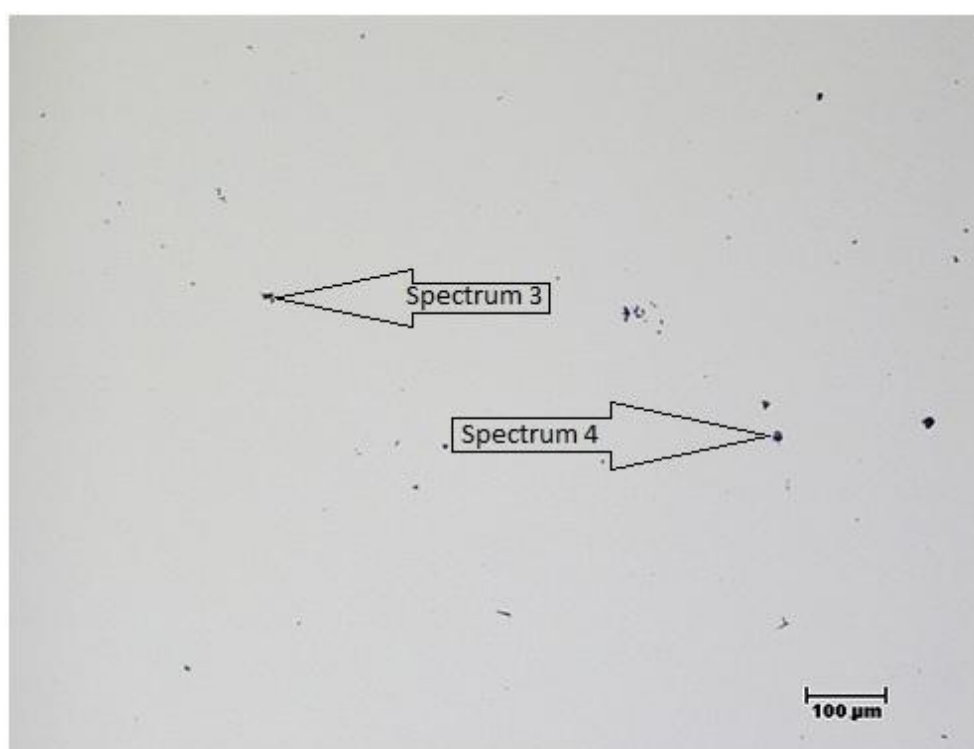
Tabulka 10 [23]

Prvkové složení v hm. %

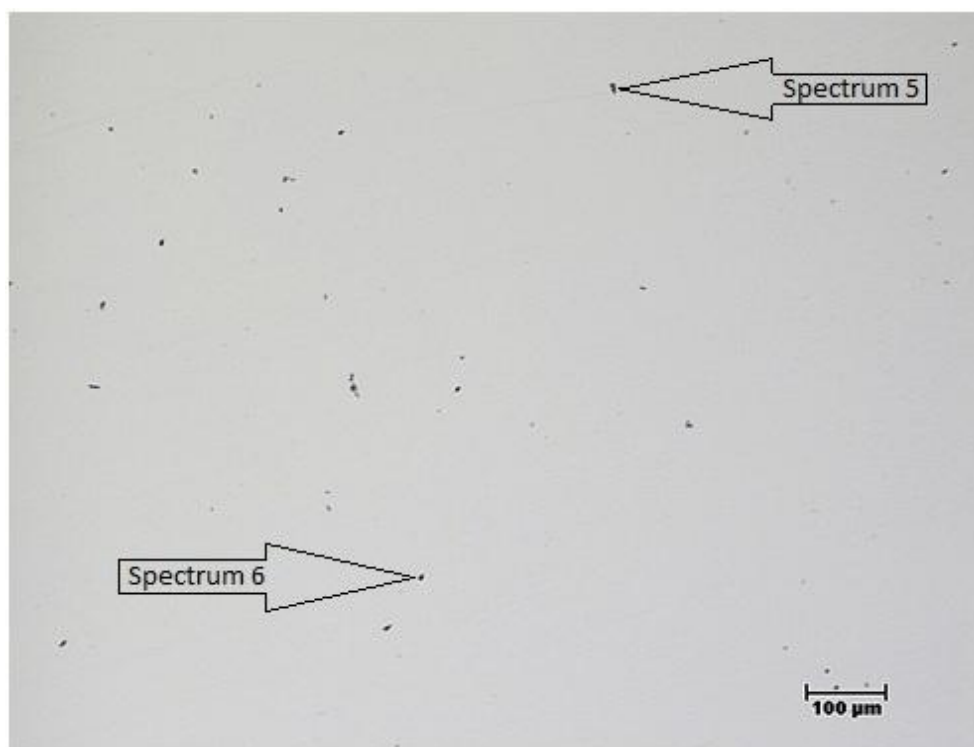
Spectrum	O	Mg	Al	S	Ca	Mn	Fe	Cd
Spectrum 1	50.43		42.11		5.25		2.21	
Spectrum 2	52.23		45.37				2.40	
Spectrum 3	45.09	7.26	32.66				14.03	0.96
Spectrum 4	46.44	1.49	40.27		3.50		8.29	
Spectrum 5	38.22	1.39	36.49				23.90	
Spectrum 6	42.14	2.30	36.14	0.69		1.10	17.61	



Obr. 48 Vzorek 4P (ocel před filtrem) zvětšeno 100x



Obr. 49 Vzorek 4U (ocel uvnitř filtru) zvětšeno 100x

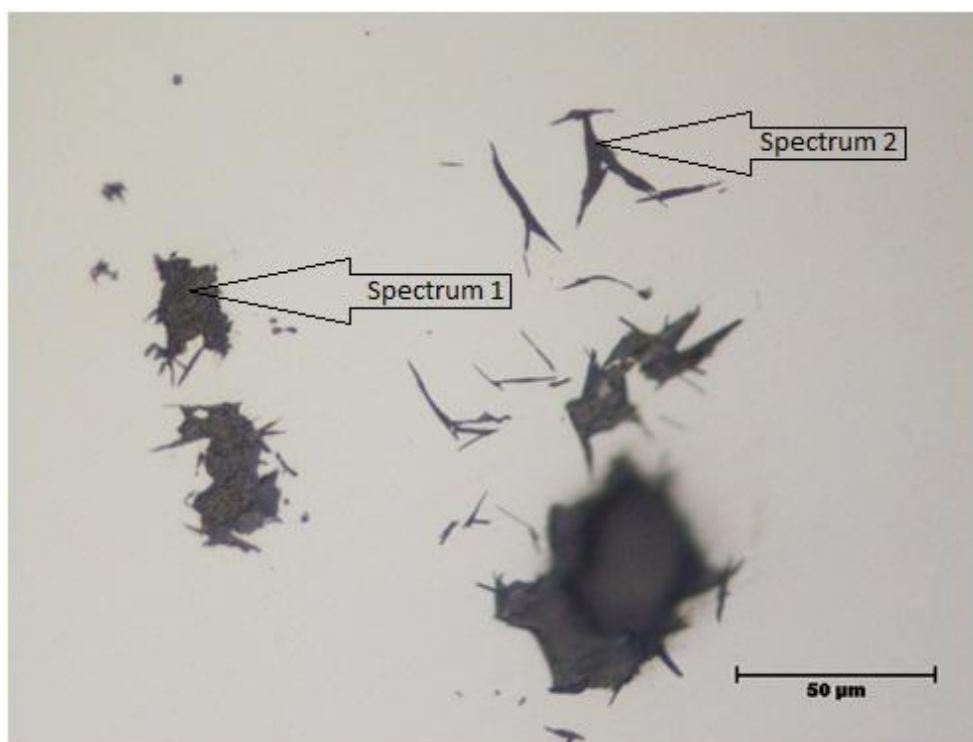


Obr. 50 Vzorek 4Z (ocel za filtrem) zvětšeno 100x

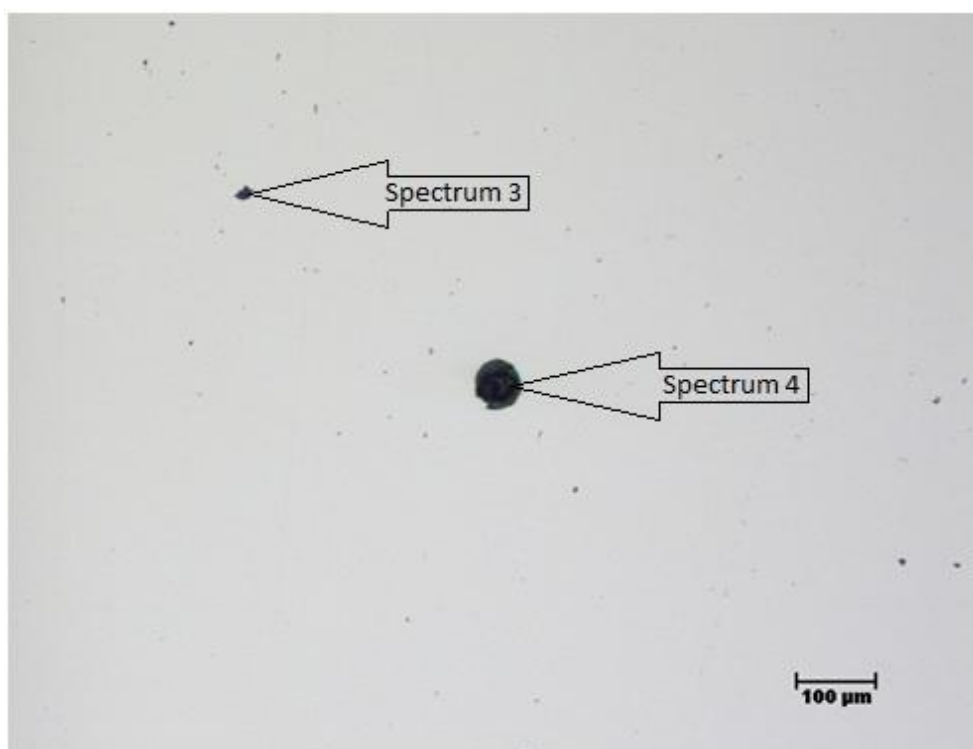
Tabulka 11 [23]

Prvkové složení v hm. %

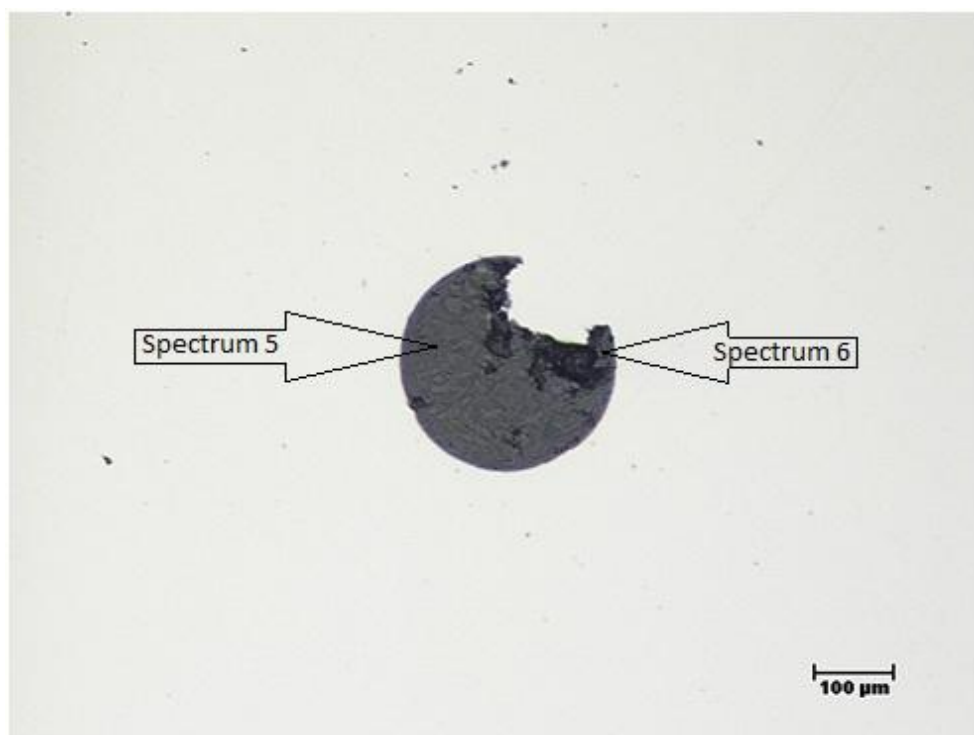
Spectrum	O	Mg	Al	Ca	Cr	Fe
Spectrum 1	51.60		47.40			1.00
Spectrum 2	25.80		23.30		1.00	49.90
Spectrum 3	46.00		43.50			10.60
Spectrum 4	49.20	1.70	43.60	3.80		1.70
Spectrum 5	47.40	4.90	40.00			7.70
Spectrum 6	51.80		47.30			0.90



Obr. 51 Vzorek 5P (ocel před filtrem) zvětšeno 500x



Obr. 52 Vzorek 5U (ocel uvnitř filtru) zvětšeno 100x

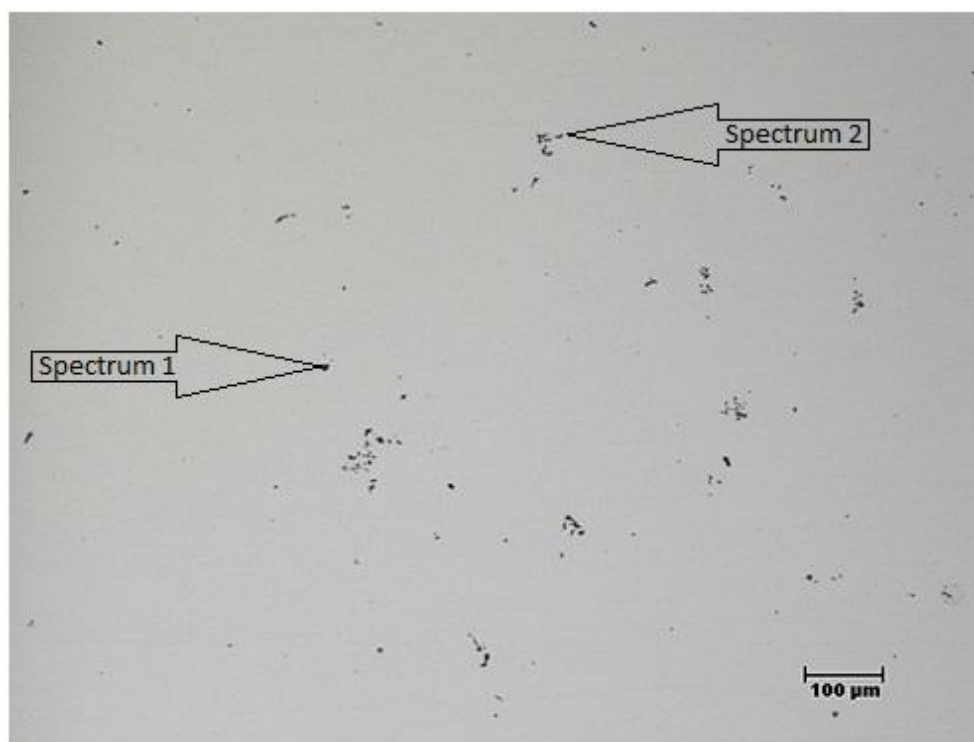


Obr. 53 Vzorek 5Z (ocel za filtrem) zvětšeno 100x

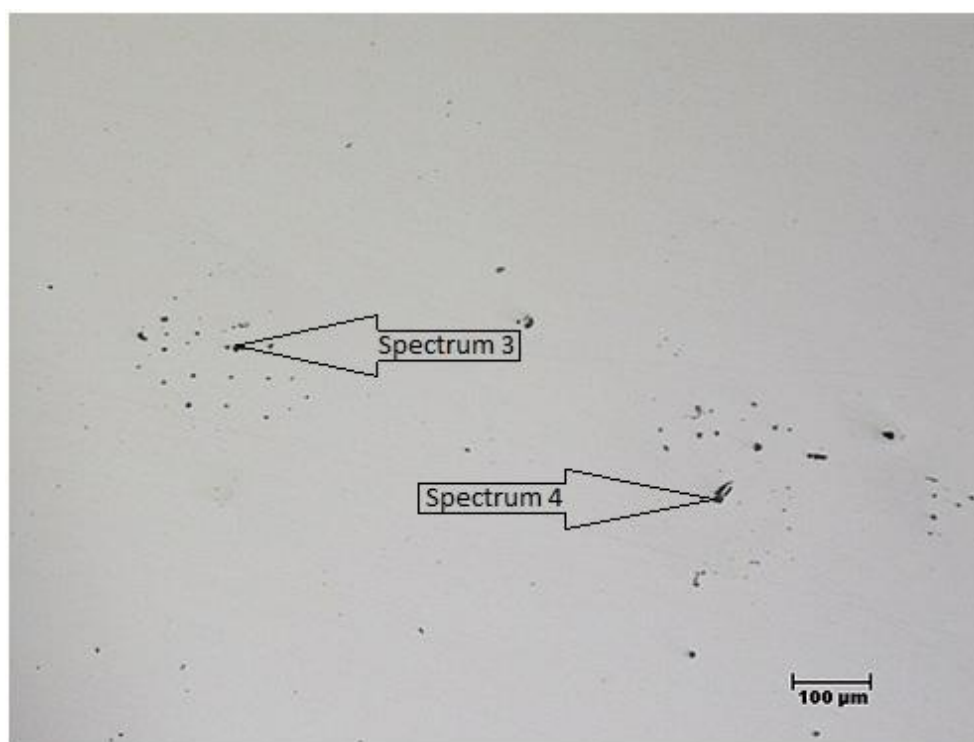
Tabulka 12 [23]

Prvkové složení v hm. %

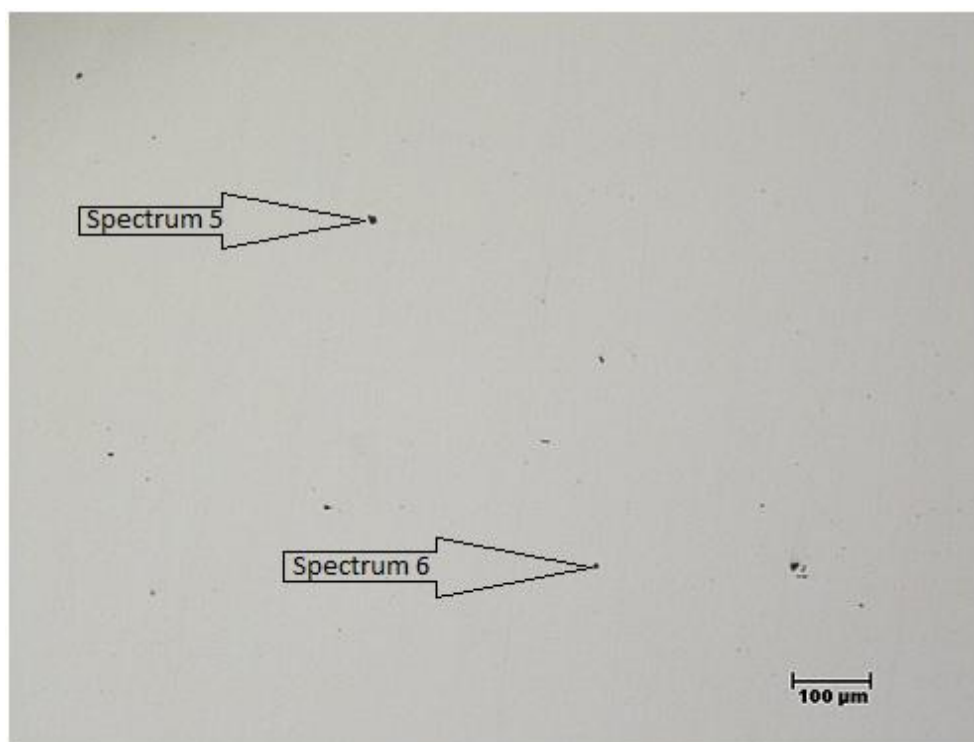
Spectrum	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Cr	Fe
Spectrum 1	27.76		28.64			3.64		39.96
Spectrum 2	19.01		17.51					63.49
Spectrum 3	33.84	0.95	22.55	0.57	1.63		0.94	39.51
Spectrum 4	52.10	0.54	41.10	0.80		5.46		
Spectrum 5	69.04		6, 43	16.62				
Spectrum 6	64.09		35.91					



Obr. 54 Vzorek 6P (ocel před filtrem) zvětšeno 100x



Obr. 55 Vzorek 6U (ocel uvnitř filtru) zvětšeno 100x



Obr. 56 Vzorek 6Z (ocel za filtrem) zvětšeno 100x

Tabulka 13 [23]

Prvkové složení v hm. %

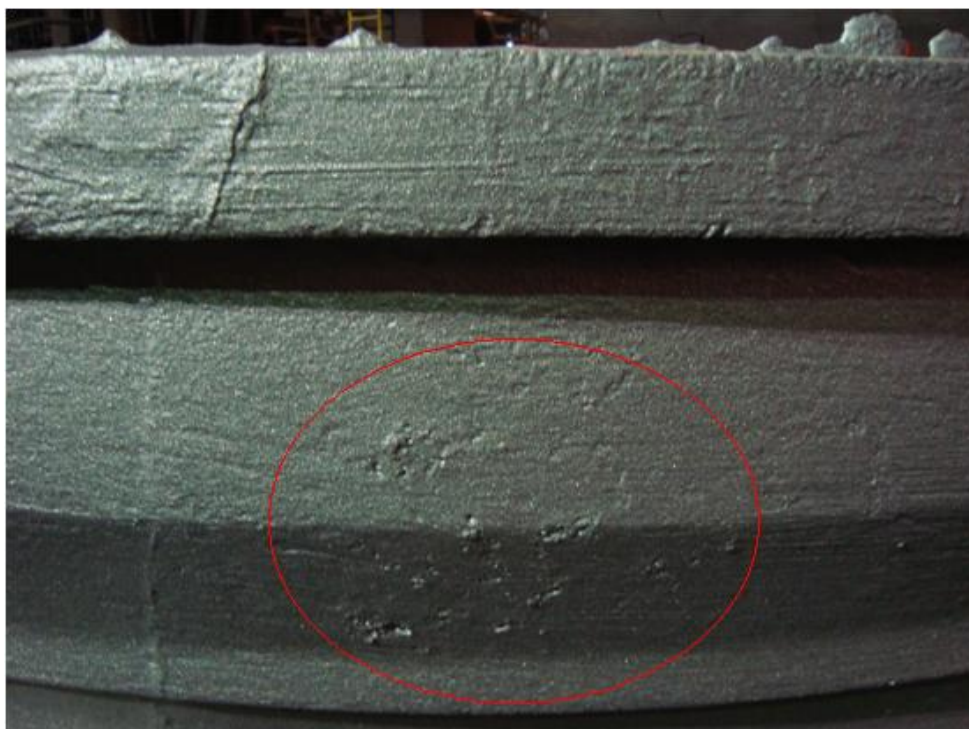
Spectrum	O	Mg	Al	S	Ca	Cr	Mn	Fe
Spectrum 1	42.20	0.90	40.60					12.40
Spectrum 2	15.60	1.40	13.60	12.10		1.30	18.70	37.40
Spectrum 3	20.20	2.90	23.50		1.60	0.80		51.10
Spectrum 4	10.70	2.50	5.90	10.90		0.70	15.50	53.90
Spectrum 5	40.50	1.20	37.80			0.40		20.00
Spectrum 6	50.40	4.00	43.80					1.90

6.2 Rozbor jakosti povrchu

Hodnocení vlivu filtrace oceli na povrch odlitku probíhalo porovnáváním čistoty povrchu mezi filtrovaným a nefiltrovaným odlitkem. Rozdíl v čistotě povrchu je ukázán na obr. 57 až 60.



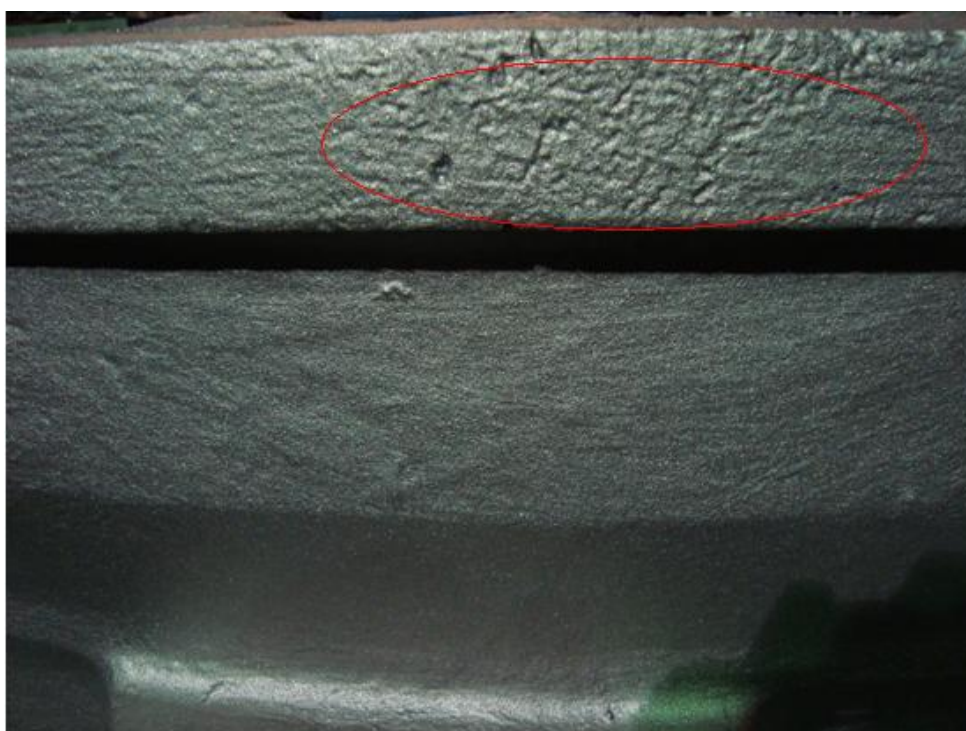
Obr. 57 Povrch nefiltrovaného odlitku



Obr. 58 Detail povrchu nefiltrovaného odlitku



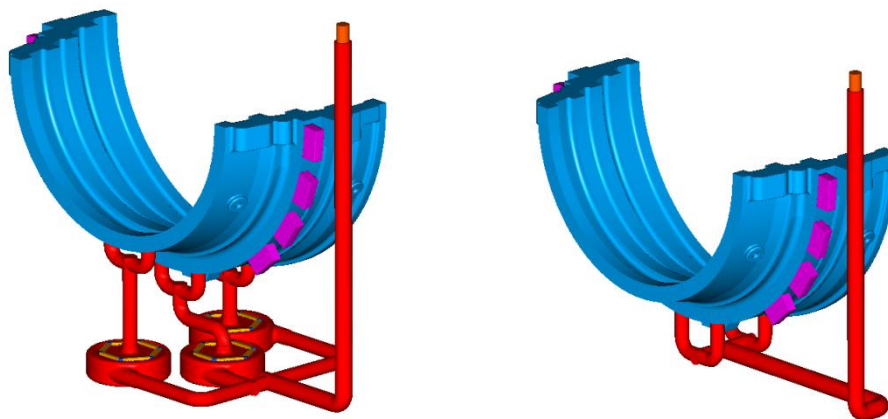
Obr. 59 Povrch filtrovaného odlitku



Obr. 60 Detail povrchu filtrovaného odlitku

7 ROZBOR MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ ODLITKŮ Z PŘILITÝCH TĚLES

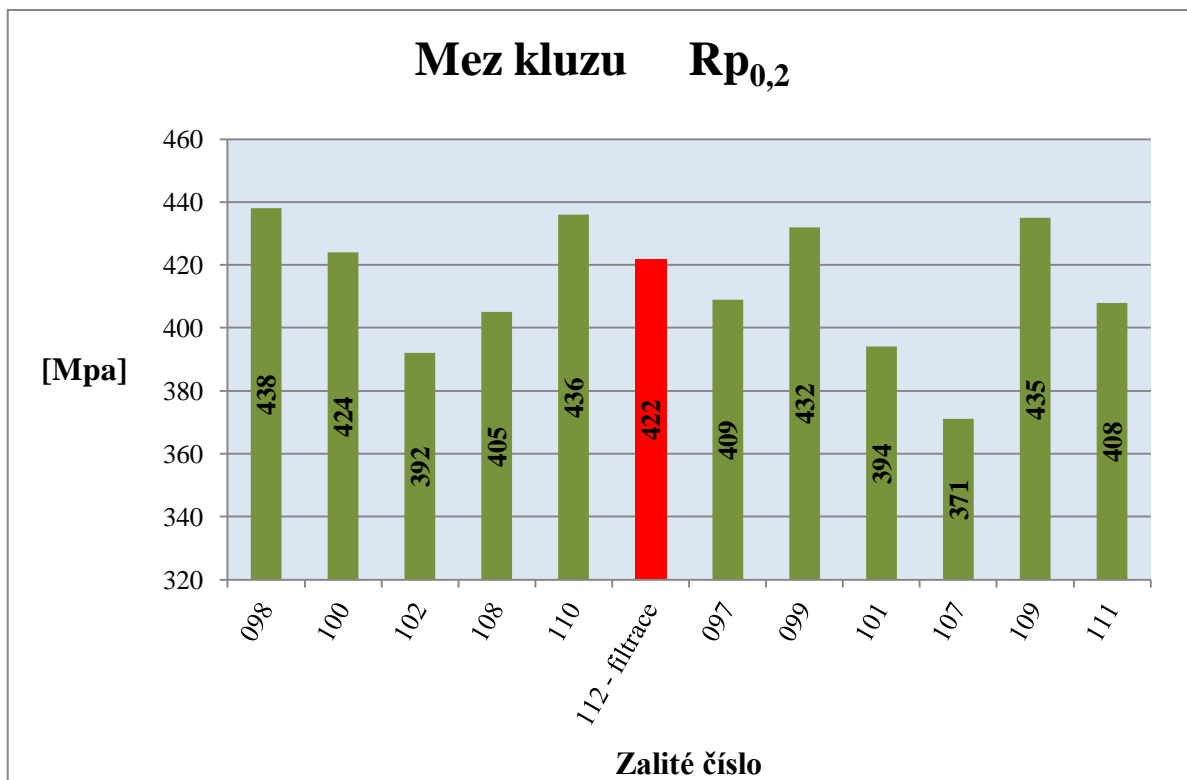
Hodnocení vlivu filtrace oceli na mechanické vlastnosti odlitku probíhalo porovnáváním výsledků tahové (trhací) zkoušky a vrubové zkoušky houževnatosti rázem v ohybu u filtrovaného a nefiltrovaných odlitků jak je uvedeno v tab. 14 a porovnáno v grafech obr. 62 až 65. Zkušební tyčinky byly odebrány z přilitých těles o rozměrech 130 mm x 80 mm x 250 mm zobrazených na obr. 61.



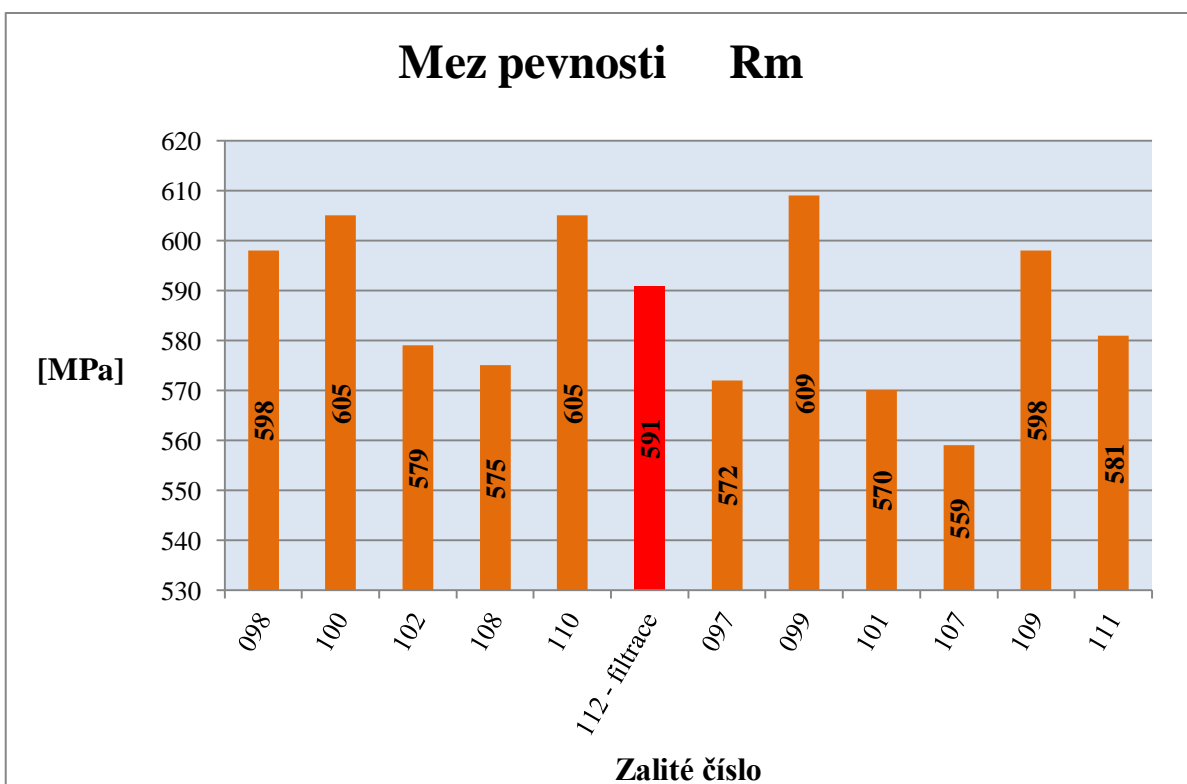
Obr. 61 Umístění zkušebních těles na odlitku filtrovaném a nefiltrovaném

Tabulka 14 Výsledky mechanických zkoušek [17]

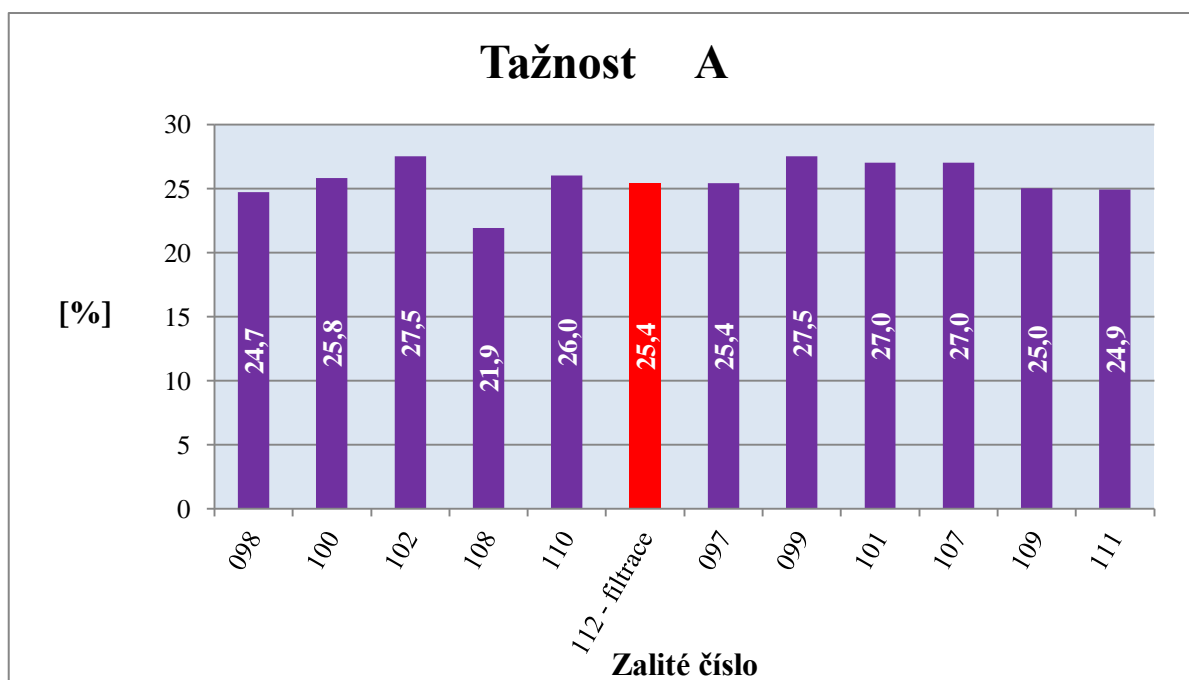
Číslo modelu	Zalité číslo	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	KV [J]
TP 18598	098	438	598	24,7	181;193;192
	100	424	605	25,8	92;129;126
	102	392	579	27,5	101;173;84
	108	405	575	21,9	137;177;152
	110	436	605	26,0	184;183;198
	112 - filtrace	422	591	25,4	153;188;150
TP 18597	097	409	572	25,4	133;187;155
	099	432	609	27,5	137;140;128
	101	394	570	27,0	145;128;141
	107	371	559	27,0	152;156;168
	109	435	598	25,0	131;176;124
	111	408	581	24,9	148;201;150



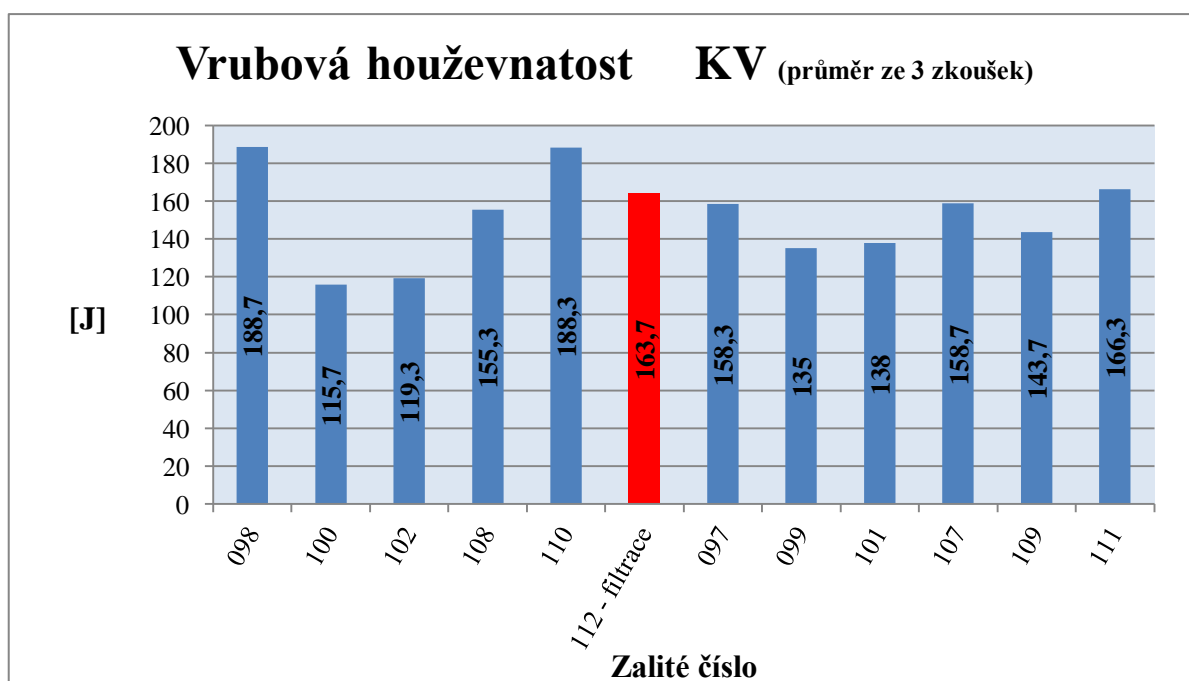
Obr. 62 Grafické porovnání hodnot meze kluzu $R_{p0,2}$



Obr. 63 Grafické porovnání hodnot meze pevnosti R_m



Obr. 64 Grafické porovnání tažnosti A₅



Obr. 65 Grafické porovnání vrubové houževnatosti KV

8 VYHODNOCENÍ ZJIŠTĚNÝCH VÝSLEDKŮ

- **Vyhodnocení mikročistoty** jednotlivých vzorků, které byly odebrány z filtračního karuselu dle rozřezového plánu, se zjistilo následující:

Vzorek 1a – ve vzorku se vyskytují převážně oxidy hliníku s podílem hořčíku a méně často sulfidy manganu. Vměstky jsou často komplexní a obsahují oxidickou i sulfidickou část. Výjimečně byl v oxidech detekován i vápník. [22]

Vzorek 2a – ve vzorku se objevují převážně oxidy hliníku s podílem hořčíku a řídce sulfidy manganu. Vměstky jsou často komplexní a obsahují oxidickou i sulfidickou část. [22]

Vzorek 1 – nejvíce vměstků je v poloze před filtrem viz obr. 39, velmi málo uvnitř filtru a za ním viz obr. 40 a 41. Přestože vměstky mají různé formy, jedná se hlavně o komplexní oxidy na bázi hliníku obsahující dále v různém množství vápník, hořčík, křemík, draslík a titan viz tab. 8. [23]

Vzorek 2 – před filtrem nacházíme většinou drobné částice nepravidelného tvaru, často se sulfidickou částí viz obr. 42 a tab. 9. Uvnitř filtru, stejně jako za ním, je částic velmi málo viz obr. 43 a 44. [23]

Vzorek 3 – před filtrem jsou drobné shluky i izolované částice viz obr. 45. Sulfidů je velmi málo viz obr. 46 a 47. Chemické složení vměstků viz tab. 10. [23]

Vzorek 4 – před filtrem se vyskytují pouze izolované částice, rozměrnější globulitické prakticky ne. Shluky oxidů téměř nejsou, sulfidy se vyskytují velmi řídce, viz obr. 48. Mezi filtrem je relativně dost drobných hlinitanů viz obr. 49, za filtrem je jich jen velmi málo viz obr. 50. Chemické složení vměstků viz tab. 11. [23]

Vzorek 5 – v oblasti před filtrem se nacházejí relativně velké částice vyplněné komplexními oxidy často s kapkami kovu a dále hlinitany nepravidelného tvaru viz obr. 51. Ve filtru se vyskytují drobné globulitické částice a jen ojediněle rozměrnější komplexní kulovité vměstky viz obr. 52. Za filtrem jsou drobné i větší hlinitany viz obr. 53. Chemické složení vměstků viz tab. 12. [23]

Vzorek 6 – před filtrem se objevují shluky drobných oxidů, viz obr. 54. Uvnitř filtru je jen velmi málo drobných hlinitanů viz obr. 55 a podobná situace je i v oblasti za filtrem viz obr. 56. Chemické složení vměstků viz tab. 13. [23]

- **Porovnání povrchů** filtrovaného a nefiltrovaného odlitku na obrázcích obr. 57 až 60 zjistíme, že filtrovaný odlitek má jen o málo lepší povrch než nefiltrovaný. U filtrovaného odlitku se objevují jen velmi zřídka zavaleniny. U nefiltrovaného odlitku je možné sledovat zavaleniny a ojediněle drobné povrchové vadičky vzniklé agresivnějším plněním dutiny formy kovem. Povrchy, které jsou označeny na obrázcích obr. 57 až 60, se dále strojně opracovávají, a proto mají přídavek materiálu. Z důvodu obrábění těchto ploch není nutné dále tyto povrchy zlepšovat.
- **Vliv filtrace na mechanické vlastnosti** odlitku není žádný. To je možné konstatovat po porovnání hodnot meze kluzu, meze pevnosti, tažnosti a vrubové houževnatosti u filtrovaného a nefiltrovaných odlitků viz obr. 62 až 65.

9 VYHODNOCENÍ CÍLŮ PRÁCE

Účinnost filtračního karuselu byla hodnocena pomocí několika kritérií:

Prvním kritériem byl rozdíl v povaze a rychlosti plnění filtrovaného a nefiltrovaného odlitku. Filtrovaný odlitek byl plněn za nižších turbulencí a rozstřiku kovu ve formě, viz obr. 23, oproti plnění původní vtokovou soustavou, kde plnění formy bylo doprovázeno turbulentním prouděním a mírným rozstřikem na stěny formy, viz obr. 24. Obě varianty plnění byly pozorovány dutinou formy při odlévání a predikovány pomocí simulačního programu MAGMASOFT.

Dalším kritériem bylo vyhodnocení zachycených vměstků ve filtračním karuselu. Vměstky, které se zachytily ve filtrech, jsou zobrazeny na obr. 35 až 56. Z popisu v kapitole 8 a chemického složení (tab. 6 až 13) lze konstatovat, že většina zachycených vměstků je produktem reoxidace při přelévání rafinované oceli do licích pánví. Obsah vměstků obsažených v jednotlivých filtrech filtračního karuselu byl dle normy ASTM E45 nízký, a proto lze při návrhu vtokové soustavy počítat s filtrační kapacitou 8 000 kg pro jeden filtrační karusel. Toto platí pouze pro ocel zpracovanou na rafinačním zařízení ASEA-SKF a následně přelitou do licí pánve.

Třetím kritériem byl vliv filtrace na povrch odlitku. Rozdíl jakosti povrchu filtrovaného a nefiltrovaného odlitku byl pouze na označených místech, jak je vidět z obr. 57 až 60.

Čtvrtým kritériem bylo zhodnocení vlivu filtrace na mechanické vlastnosti odlitku. Toto zkoumání neprokázalo žádný vliv filtrace na mechanické vlastnosti odlitku, jak je možné porovnat z obr. 62 až 65.

Posledním kritériem vyhodnocení bylo porovnání ceny filtračních karuselů se zlepšením jakosti odlitku. Cena filtračních karuselů je velmi vysoká pokud vezmeme v úvahu pouhé zlepšení plnění formy kovem.

Z těchto pěti kritérií je možné vyslovit následující závěr:

Použití filtračních karuselů k filtraci oceli má velký význam ve slévárnách, kde není roztavená ocel dále rafinována pomocí sekundární metalurgie, takže je odlévána ihned po odpichu z elektrické obloukové pece do licí pánve.

Aby se nemuselo ve slévárně PILSEN STEEL s.r.o., kde se odlévá pouze ocel rafinovaná na zařízení ASEA-SKF, používat filtrace oceli, lze provést optimalizaci vtokových soustav a velmi náročné odlitky odlévat z rafinačních pánví ASEA. V případě, že nelze optimalizovat vtokovou soustavu, je vhodné tyto filtrační karusely využít.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ROUČKA, J.: Filtrace slévárenských slitin, VUT Brno 2001, ISBN 80-02-01389-1
- [2] OTÁHAL, V.: Tvárná litina, Brno 2005 (str. 375-382)
- [3] BEELEY, P.: Foundry Technology, Butterworth - Heinemann, Oxford 2001 (str. 39-49), ISBN 0-7506-4567-9
- [4] Typy filtrů a jejich použití
<http://lanik.cz/index.php/Filtran-technologie/Typy-filtr-a-jejich-pouiti/> [cit. 20.11.2009]
- [5] Filtrace těžkých odlitků
<http://lanik.cz/index.php/Filtran-technologie/Filtrace-tkch-odlitk/> [cit. 20.11.2009]
- [6] Katalog fa. Hi-Tech Ceramics
- [7] Katalog fa. Z-MODEL
- [8] ŠENBERGER, J.: Metalurgie oceli na odlitky, skriptum VUT Brno 2003, ISBN 978-80-214-3632-9 (váz.)
- [9] BENDA, M.: Elektrometalurgie, skriptum VŠB-TU Ostrava 1989
- [10] Sázení a tavení v elektrických obloukových pecích, technická směrnice fa. PILSEN STEEL s.r.o., TS/09/71.05, 25.03.2009
- [11] Rafinace oceli na zařízení ASEA-SKF, technická směrnice fa. PILSEN STEEL s.r.o., TS/09/71.07, 25.03.2009
- [12] Tavební list elektrické obloukové pece č. 5, číslo 17848, fa. PILSEN STEEL s.r.o., 10.09.2009
- [13] Tavební list pánvové rafinační pece ASEA-SKF, číslo 17849, fa. PILSEN STEEL s.r.o., 10.09.2009
- [14] Odlévací list ocelárny, číslo 7709, fa. PILSEN STEEL s.r.o., 10.09.2009
- [15] Licí kniha slévárny, denní záznam lití z 10.09.2009, fa. PILSEN STEEL s.r.o., 10.09.2009
- [16] Zápis technické kontroly ocelárny, číslo 592, fa. PILSEN STEEL s.r.o., 10.09.2009
- [17] Průvodka tepelného zpracování pro TP 18598-II z.č.: 104112 a pro TP 18597-II z.č.: 104111, fa. PILSEN STEEL s.r.o., 10.09.2009
- [18] Výrobní postup odlitku pro TP 18598-II a pro TP 18597-II, fa. PILSEN STEEL s.r.o., 10.09.2009
- [19] Katalog fa. Foseco
- [20] Katalog fa. Keramtech
- [21] KEPKA, M.: Rafinace oceli, Praha SNTL 1989
- [22] Protokol o zkoušce, č.: VYZ-0952-0642-01A, fa. ŠKODA VÝZKUM s.r.o., 02.10.2009

- [23] Technická zpráva, č.: VYZ/TZ/52/099/2009, fa. ŠKODA VÝZKUM s.r.o., 30.11.2009
- [24] SIEVERS, U.: The filtration of large castings in selected iron and steel foundries
60th World Foundry Congress, The Hague, 1993
- [25] HECKMAN, D.: Reticulated Filtration of Large Ferrous Casts and Castings,
AFS conference, San Antonio, 2002